

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE GRADO

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Andrés Hernández Molpeceres
Tutor: Carlos Aguirre Maeso
Ponente: Andrés Hernández Molpeceres

Julio 2014

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Resumen

En el presente trabajo se tratará sobre la detección de determinados fenómenos meteorológicos en la atmósfera de Marte, concretamente dust devils, empleando distintos algoritmos para este fin.

Los dust devils son remolinos de polvo, son semejantes a los tornados terrestres, que se forman cuando el aire caliente cerca de la superficie se eleva rápidamente hacia una bolsa de aire frío de baja presión por encima de ella. Los más grandes pueden representar una amenaza para la tecnología terrestre enviada a Marte, de ahí la importancia de su detección.

En primer lugar se expondrá un resumen a modo de estado del arte de las principales técnicas de detección de eventos y de análisis de señal que han tenido relevancia en el desarrollo de las técnicas de análisis tiempo-frecuencia.

Se desarrollará y analizará el funcionamiento de varios algoritmos basados en distintos métodos y algoritmos de detección de fenómenos y patrones sobre series temporales de datos. En concreto para detectar estos fenómenos se utilizarán datos de presión atmosférica recogidos en Marte, ya que los dust devils se manifiestan como bajadas bruscas en los valores de la presión durante un periodo de tiempo muy corto.

A partir de los datos recogidos por la sonda marciana Mars Pathfinder a lo largo de su misión en el planeta rojo, se procesarán y analizarán, mediante el uso de estos algoritmos, con el fin de detectar los fenómenos atmosféricos conocidos como dust devils.

Finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos con los distintos algoritmos y métodos de detección, a la hora de detectar los dust devils, y se comparará el rendimiento y funcionamiento de éstos algoritmos con el fin de determinar cuál de ellos podría resultar más conveniente para su utilización en una sonda destinada a una misión espacial.

Palabras clave: Marte, Mars Pathfinder, dust devils, detección de eventos, análisis de señal.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Abstract

The present work will deal with the detection of certain weather phenomena in the atmosphere of Mars, dust devils specifically, using different algorithms for this purpose.

The dust devils are dust devils are similar to terrestrial tornadoes that form when hot air near the surface rises quickly to a bag of cold low pressure air above it. The largest can threaten terrestrial technology sent to Mars, hence the importance of their detection.

First, a summary about the state of the art of the main techniques of event detection and signal analysis, that have relevance in the development of the techniques of time-frequency analysis, will be discussed.

The project will develop and analyze the performance of several methods based on different patterns and phenomena detection methods and algorithms over time series data. Specifically, to detect these atmospheric phenomena, the pressure data collected from Mars will be used. This is because the dust devils manifest as sudden drops in pressure values during a very short time.

From the data collected by the Mars Pathfinder Mars probe along his mission in the red planet, the data will be processed and analyzed through the use of these algorithms in order to detect the atmospheric phenomena known as dust devils.

Finally, an analysis of the results obtained, with different detection algorithms and methods to detect dust devils, will be performed, and the functioning and performance of these algorithms will be compared in order to determine which of them might be more convenient for use in a probe destined for a space mission.

Keywords: Mars, Mars Pathfinder, dust devils, event detection, signal analysis.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Indice

1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	1
1.2. Estructura de la memoria	3
2. Estudio del arte	4
2.1. Algoritmos disparadores y detectores de fase en sismología	4
2.1.1. Métodos en el dominio del tiempo	5
2.1.2. Métodos en el dominio de la frecuencia	6
2.2. Transformadas integrales	8
2.2.1. Transformadas lineales	8
2.2.2. Transformadas bilineales	14
3. Marte	16
3.1. La atmósfera	17
4. Origen de los datos	20
4.1. Misión Pathfinder	20
4.2. Datos recogidos	23
5. Análisis mediante algoritmos disparadores	28
6. Análisis mediante tomografía	31
6.1. Ejemplos	32
7. Pruebas y análisis de resultados	37
7.1. Pruebas mediante algoritmo STA/LTA	37
7.2. Pruebas mediante tomografía	44

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

8. Conclusiones	48
Referencias	49
Anexo A	51

Índice de tablas

Tabla 1: Conversiones típicas de $f(t)$ y $F(s)$	11
Tabla 2: Comparación de características Tierra/Marte.....	16
Tabla 3: Detecciones para distintos valores de $Nlta$	36
Tabla 4: Detecciones para distintos umbrales.....	40

Índice de figuras

Figura 1: Comparación de transformadas de Fourier y Wavelet.....	9
Figura 2: Transformadas de Wavelet discreta y continua.....	10
Figura 3: Transformada de Fourier.....	11
Figura 4: Imagen de Marte.....	16
Figura 5: Dust devil en Marte fotografiado por el rover Spirit.....	17
Figura 6: Ilustración del rover y sonda de la misión Pathfinder.....	21
Figura 7: Instrumentos de la sonda Pathfinder.....	22
Figura 8: Organización de los ficheros de datos.....	23
Figura 9: Ejemplo del interior de un fichero.....	24
Figura 10: Formato de los datos.....	24
Figura 11: Aspecto tras la extracción de los datos.....	25
Figura 12: Salidas de algoritmos detectores de fase.....	29
Figura 13: Señales tipo para adaptar el tomograma.....	33
Figura 14: Procesado mediante tomografía. Ejemplo 1.....	34
Figura 15: Señales típicas para el ejemplo 2.....	34
Figura 16: Análisis mediante tomografía para el ejemplo 2.....	35
Figura 17: Análisis mediante tomografía para el ejemplo 3.....	36
Figura 18: Gráfica del número de dust devils detectados en función de $Nlta$	38
Figura 19: Dust devils en el sol 68.....	39
Figura 20: Dust devil en el sol 36.....	40
Figura 21: Región del sol 72 donde se detecto un falso positivo.....	41
Figura 22: Gráfica del número de detecciones en función del umbral.....	42
Figura 23: Región del sol 27 donde se detecto un falso positivo.....	43
Figura 24: Dust devils detectados con los valores óptimos.....	44
Figura 25: Tomograma sin detección.....	45
Figura 26: Tomograma para el sol 3.....	45
Figura 27: Tomogramas con detecciones para el sol 34.....	46
Figura 28: Tomograma con falso positivo para el sol 33.....	46

1. Introducción

El estudio para un mayor y mejor conocimiento de Marte es actualmente uno de los principales objetivos de la astronomía, y en general de la ciencia. Dentro de nuestro sistema solar es el único planeta, a parte de la Tierra, que posee unas características, dentro de ciertos valores, como son el tamaño, la gravedad o su distancia a nuestro planeta, que lo hacen el principal candidato para una colonización en un futuro lejano. Teniendo tan alto objetivo para el futuro, ya se han comenzado a dar los primeros pasos necesarios para lograrlo, como son su estudio primero desde la tierra, y posteriormente sobre el terreno mediante el envío de varios satélites y sondas. Todo esto ha resultado de gran importancia para conocer con datos reales las condiciones a las que nos enfrentaríamos allí. Los esfuerzos por parte de la ciencia continúan, y poco a poco se van conociendo y mejorando los conocimientos que se tienen sobre Marte y sus condiciones ambientales y cada día estamos mas cerca de poner un hombre sobre su superficie.

Como parte del estudio de Marte, la atmósfera y los fenómenos que en ella se producen son una de las principales ramas de interés por parte de la ciencia. Gran parte del avance en su estudio no sería posible, o al menos no de una forma tan rápida y relativamente sencilla, si no fuera gracias al uso de ordenadores y en general de la ciencia computacional.

Desde la aparición de los ordenadores se ha aprovechado la capacidad de éstos para realizar cálculos que, de otra manera, requerirían mucho tiempo. Gracias a esto, se abrió una puerta para abordar problemas anteriormente irrealizables por la complejidad de sus cálculos y el tiempo y recursos gastados en ellos. Con la revolución de las computadoras y la ciencia computacional se nos permitía abordar dichos problemas en un tiempo razonable. Es evidente el gran salto que se produjo en el avance de la astronomía con la introducción de los ordenadores y sistemas empujados, para la recogida, procesado y análisis de los datos.

1.1. Motivación y objetivos

La detección de determinados fenómenos meteorológicos en Marte es de gran importancia dentro de la exploración de este planeta. La razón es que, en la fase de descenso de naves en la atmósfera de Marte, la presencia de ciertos fenómenos, como tornados, puede desplazar la zona objetivo de descenso de la nave, posándose sobre una zona con difícil movilidad e imposibilitando el correcto desarrollo posterior de misiones con elevados costes económicos. Es fácil darse cuenta del reto que constituye predecir el comportamiento de estos fenómenos, algo lógico debido al riesgo que conllevan para las misiones.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

El estudio del comportamiento de la atmósfera resulta difícil de modelar, ya que intervienen un gran número de variables, y resulta muy costoso y difícil tener un gran número de sensores y detectores que puedan obtener datos de forma global de ésta. Para tener una mejor comprensión de lo que se va a estudiar, se dará una visión general de las características de Marte, especialmente su atmósfera.

Teniendo en cuenta que este proyecto está enfocado desde un punto de vista académico y las detecciones están basadas en cálculos teóricos, sobre el aspecto que presentaría un dust devil, y no pueden ser contrastadas, no se espera una detección totalmente fiable y puede conllevar un gran nivel de imprecisión.

Las expectativas del proyecto se centran en:

- Estudio y visión general de las condiciones atmosféricas y fenómenos meteorológicos de Marte.
- Exposición y explicación de las distintas técnicas matemáticas, como son las transformadas tiempo-frecuencia, que sirvieron como precursoras para el desarrollo de la tomografía.
- Implementar y comparar los resultados de aplicar varias técnicas de detección de eventos en series temporales, a partir del análisis de técnicas de detección de eventos y transformación de señales.

1.2. Estructura de la memoria

Capítulo 1 – Introducción: Exposición de la motivación y objetivos que se pretenden alcanzar en el presente trabajo.

Capítulo 2 – Estado del arte: Un resumen de algunos métodos empleados para la detección de eventos en series temporales, y los principales métodos de análisis en tiempo-frecuencia de señales que dieron lugar a la técnica de la tomografía.

Capítulo 3 – Marte: Se dará una visión de las principales características de Marte, especialmente su atmósfera, y su comparación con la Tierra para tener un conocimiento básico de el contexto donde se tomaron las muestras con las que se trabajará.

Capítulo 4 – Origen de los datos: En esta sección se dará una visión de la misión Mars Pathfinder y se hará hincapié en las características de los datos recogidos durante la misión y su tratamiento.

Capítulo 5 – Análisis mediante algoritmo disparadores: Se analizarán y expondrán los métodos y técnicas utilizadas para la implementación de un detector basado en este tipo de algoritmos.

Capítulo 6 – Análisis mediante tomografía adaptada: En este capítulo se estudiará y explicará el análisis y detección mediante la técnica de la tomografía.

Capítulo 7 – Pruebas y resultados: En esta sección se explicarán las pruebas a realizar y los resultados de las mismas.

Capítulo 8 – Conclusiones: Se resumirán los puntos más importantes y las impresiones generales del proyecto y su ámbito de estudio.

2. Estudio del arte

2.1. Algoritmos disparadores y detectores de fase en sismología

La sismología tiene una larga historia en el uso de algoritmos digitales para la detección de eventos[1], en concreto de llegadas de fase en señales con presencia de ruido, estacionario y no estacionario, y han sido usados principalmente para poder trabajar con la gran cantidad de datos recogidos por los sistemas que monitorizan la actividad sísmica, y reducirlos a niveles manejables.

Actualmente, gracias a el almacenamiento digital de bajo costo, estos algoritmos se utilizan cada vez mas para detectar eventos en segmentos de señal en sistemas continuos digitales de motorización y registro de datos.

En el transcurso del desarrollo de sistemas automatizados de detección y localización de eventos, basados en la correlación de forma de onda, se ha estudiado la capacidad de este tipo de algoritmos para mejorar la detección de las llegadas de fase sísmicas en flujos de datos sísmicos. En concreto, se han considerado algoritmos generados por energía transitoria como el STA/LTA, Z-detector, de frecuencia transitoria y algoritmos de polarización.

Estos algoritmos requieren de un conjunto de flujos de datos de entrada que tengan una superficie lisa con bajo nivel de ruido de fondo. Estas señales también contendrán picos en ocasiones, y se corresponderán a llegadas de fase. El algoritmo utilizado para generar estos flujos de datos a partir de sismogramas deben funcionar bien bajo una amplia gama de fuentes, dispositivos, receptores y el escenarios de ruido. Las capacidades de cómputo actuales permiten la aplicación de algoritmos mucho más robustos que los utilizados históricamente en tiempo real. Sin embargo, los cálculos de alta complejidad aún pueden ser computacionalmente demasiado costosos para las estaciones de trabajo actuales, cuando el número de flujos de datos es demasiado grande.

Conceptualmente, estos algoritmos son comprobadores de patrones, que detectan eventos por la correlación de los flujos de datos sísmicos. El producto escalar está formado entre las formas de onda observadas y esperadas, para los retardos esperados en función de la distancia de origen de la señal, que se corresponden con una cuadrícula geográfica de los epicentros.

La salida de estos algoritmos consiste en un valor de correlación dependiente del tiempo para cada punto de la cuadrícula del volumen de la Tierra.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Una alta correlación indica que una señal sísmica está presente en los datos, y que los flujos de datos se han organizado adecuadamente en el espacio y tiempo. Una baja correlación indica que los flujos de datos no se han organizado adecuadamente en el espacio y tiempo o la falta de un patrón consistente de llegada de fase.

Una ventaja significativa de esta metodología es que no se requiere un identificador de fase a priori para identificar o localizar a un evento. Como la correlación de las formas de onda sin procesar actualmente requeriría unos modelos altamente costosos y un número inmanejable de parámetros, el éxito de estos sistemas está fuertemente condicionado por nuestra capacidad para pre-procesar los datos para realzar el mayor número de las llegadas de fase tiempo casi real.

Muchos algoritmos que pueden realizar esta función han sido previamente desarrollados como disparadores para iniciar la recopilación de datos. Estos sistemas de detección se pueden clasificar en cuatro categorías generales: de dominio del tiempo, de dominio de la frecuencia, movimiento de partículas, y procesado con tamaño de ventana adaptativo.

2.1.1. Métodos en el dominio del tiempo

Walter F. Freiburger(1963) desarrolló la teoría para el detector de la máxima probabilidad suponiendo una señal Gaussiana superpuesta sobre ruido Gaussiano. Desafortunadamente, los datos reales no son tan estadísticamente predecibles.

Vanderkulk(1965) utilizó un algoritmo STA / LTA para operar en los datos rectificadas al valor absoluto, porque en aquel entonces era mucho menos costoso que el cuadrado de los datos.

Allen(1978) desarrolló un detector basado el cuadrado de los datos, más el cuadrado ponderado de la primera derivada. Esto crea series temporales que incluyen componentes tanto de los datos no filtrados como de los datos filtrados mediante un filtro paso alto, y luego estas series se someten a una serie de test matemáticos y lógicos para la identificación de la fase.

Stewart (1977) utiliza un análisis envolvente de datos modificado (MDX) basado en la derivada de los datos, donde los cambios de pendiente están enfatizados. Para hallar el valor MDX encontramos primero la derivada (DX) en el punto i-ésimo:

$$DX_i = X_i - X_{i-1}$$

Si el signo de DX se mantiene constante por menos de 8 iteraciones consecutivas entonces:

$$MDX_i = MDX_{i-1} + DX_i$$

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

En el caso contrario tendremos:

$$MDX_i = DX_i$$

Se obtiene una serie temporal resultante de aplicar un filtrado de tipo paso alto conservando su naturaleza oscilatoria y enfatizando los cambios en las señales. Se deberán establecer unos criterios y umbrales para decidir cuándo se ha detectado un evento.

2.1.2. Métodos en el dominio de la frecuencia

Shensa (1977) propuso utilizar la transformada rápida de Fourier para desarrollar un detector basado en la densidad espectral. Partiendo de aquí, desarrolló tres algoritmos: el detector de potencia media, el detector de máxima desviación, y el detector de desviación media.

EL detector de potencia media halla la densidad espectral para cada momento temporal (i). Su salida viene dada por:

$$Y_i = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=n_1}^{n_2} P_i(k) - \mu}{\sigma} \quad N = n_2 - n_1$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar respectivamente, de $P_i(k)$. Este detector es óptimo para señales débiles que sobrepasan el ruido uniformemente sobre una banda de frecuencia(k), donde el ruido y la señal son estables.

El detector de máxima desviación normaliza la densidad espectral para cada frecuencia (k). El valor máximo a lo largo de todas las frecuencias (Z_i) es la salida para cada momento temporal (i).

$$z_i(k) = \frac{P_i(k) - \mu(k)}{\sigma(k)},$$
$$Z_i = \text{MAX}[z_i(k = 0), z_i(k = 1), \dots, z_i(k = N)]$$

Este detector es óptimo para señales débiles que sobrepasan el ruido sobre al menos una banda estrecha de frecuencia.

El detector de desviación media determina la densidad espectral normalizada para un índice de frecuencia dada. La salida (X) para cada momento temporal (i), es el promedio de esta densidad espectral normalizada (Z_i) a través de un rango frecuencias (k).

Deteccción de tornados en la atmósfera de Marte

$$X_i = \frac{1}{N} \sum_{k=n_1}^{n_2} z_i(k) \quad N = n_2 - n_1.$$

Este detector es óptimo para señales débiles que sobrepasan el ruido uniformemente sobre un amplio rango de frecuencias, donde el ruido y la señal son inestables.

Goforth y Herrin(1980) utilizaron la transformada de Walsh (análogo a una descomposición de Fourier, usando ondas cuadradas en vez de sinusoides) para generar los pesos de los filtros en algunas bandas frecuencia. El disparador utiliza una media a corto plazo de los pesos de Walsh y la compara con la mediana y el percentil 75° de una serie a largo plazo de los pesos.

Masso et al. (1979) desarrolló el detector MARS. Este primero aplica una serie de filtros de paso de banda a la serie temporal, a continuación, busca cada paso banda para los picos de energía. La separación temporal de estos picos se usa posteriormente para reducir la ventana de tiempo sobre la que se busca el valor de energía más alto. Este valor se utiliza luego como disparador.

Swindell y Snell (1977) desarrollaron el Z-detector, donde Z es la variable normalizada:

$$Z(x_i) = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

donde x es la STA, μ es la media de la STA y σ es la desviación típica de STA. Éste estima la distancia de los datos en la media a la desviación típica Este algoritmo tiene la ventaja de adaptarse de forma automática a la variación del ruido de fondo, es decir, si el ruido es elevado sera necesaria una entrada también elevada para generar un cambio en la salida, y de igual forma en el caso de poco ruido.

2.2. Transformadas integrales

Una transformada integral [2] es cualquier transformada T aplicada sobre la función $f(x)$ de la forma siguiente:

$$T(f(t)) = \int_{t_1}^{t_2} K(u, t) f(t) dt = F(u)$$

La entrada de esta función T encontramos una función $f(t)$, y la salida otra función $F(u)$. Una transformada es un tipo especial de operador matemático. En ella t_1 y t_2 son dos valores que dependen de su definición, y pueden variar desde $+\infty$ hasta $-\infty$.

Hay numerosas transformadas integrales útiles. Cada una depende de la función K de dos variables escogida, llamada la función núcleo de la transformación. Un núcleo simétrico es el que es inalterado cuando las dos variables son permutadas. Algunos núcleos tienen una K inversa asociada, $K^{-1}(u, t)$, que da una transformada inversa:

$$f(t) = \int_{u_1}^{u_2} K^{-1}(u, t) T(f(t)) du.$$

La motivación detrás de las transformadas integrales es fácil de entender. Hay muchas clases de los problemas que son difíciles de solucionar en sus representaciones originales. Una transformada integral mapea una ecuación de su dominio original en otro dominio adecuado, por ejemplo, una función senoidal en el dominio del tiempo puede ser representada como un fasor en el dominio de la frecuencia. La manipulación y la solución de la ecuación en el dominio objetivo son, cuando el método está bien escogido, mucho más fáciles que la manipulación y la solución en el dominio original. La solución entonces es mapeada al dominio original con la transformada inversa. A continuación se expondrán los principales tipos de transformadas que sirvieron como base para el posterior desarrollo de la tomografía.

2.2.1. Transformadas lineales

Se denomina transformación lineal[3] a toda aplicación cuyo dominio y codominio sean espacios vectoriales que cumplan:

Sean V y W espacios vectoriales sobre el mismo cuerpo K . Una aplicación T de V en W es una transformación lineal si para todo par de vectores u, v pertenecientes a V y para todo escalar k perteneciente a K se satisface que:

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

$$T(u + v) = T(u) + T(v)$$

$$T(ku) = kT(u)$$

A continuación se expondrá un breve resumen de algunas de las transformadas lineales más importantes y relevantes.

Transformada de Wavelet

En matemáticas, una serie de wavelets(ondículas en español) es una representación de una función cuadrada e integrable, con valores reales o complejos, por cierta serie ortonormal(un conjunto de vectores es ortonormal si es a la vez un conjunto ortogonal y la norma de cada uno de sus vectores es igual a 1) generada por una señal oscilante. La transformada de wavelet es una de las transformadas tiempo-frecuencia más utilizadas actualmente.

La transformada de wavelet se define como:

$$[W_{\psi} f](a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx$$

Sus coeficientes C_{jk} vienen dados por:

$$c_{jk} = [W_{\psi} f](2^{-j}, k2^{-j})$$

La señal transformada proporciona información sobre el tiempo y la frecuencia, por lo que la transformada de wavelet contiene información similar a la transformada de Fourier de tiempo corto, pero con propiedades especiales adicionales, que se mostrarán en la resolución del tiempo para frecuencias más altas de análisis. La diferencia en la resolución del tiempo para frecuencias mayores para la transformada de Fourier y la transformada wavelet puede verse en la figura 1.

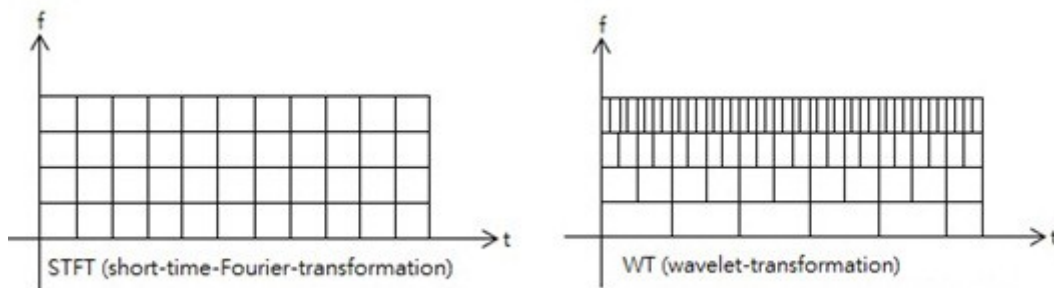


Figura 1: Comparación de transformadas de Fourier y Wavelet

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

La transformada de Wavelet discreta suele utilizarse para la codificación de señales, mientras la continua se utiliza en el análisis de señales. La continua es más utilizada en física, mientras que la discreta tiene un mayor uso en ramas como la ingeniería e informática. Actualmente se está desplazando el uso de la transformada de Fourier hacia la de Wavelets, en ramas muy diversas como el estudio de las turbulencias y la mecánica cuántica, el estudio del ADN, el análisis de proteínas, la meteorología, el análisis multifractal y en el campo de biometría.

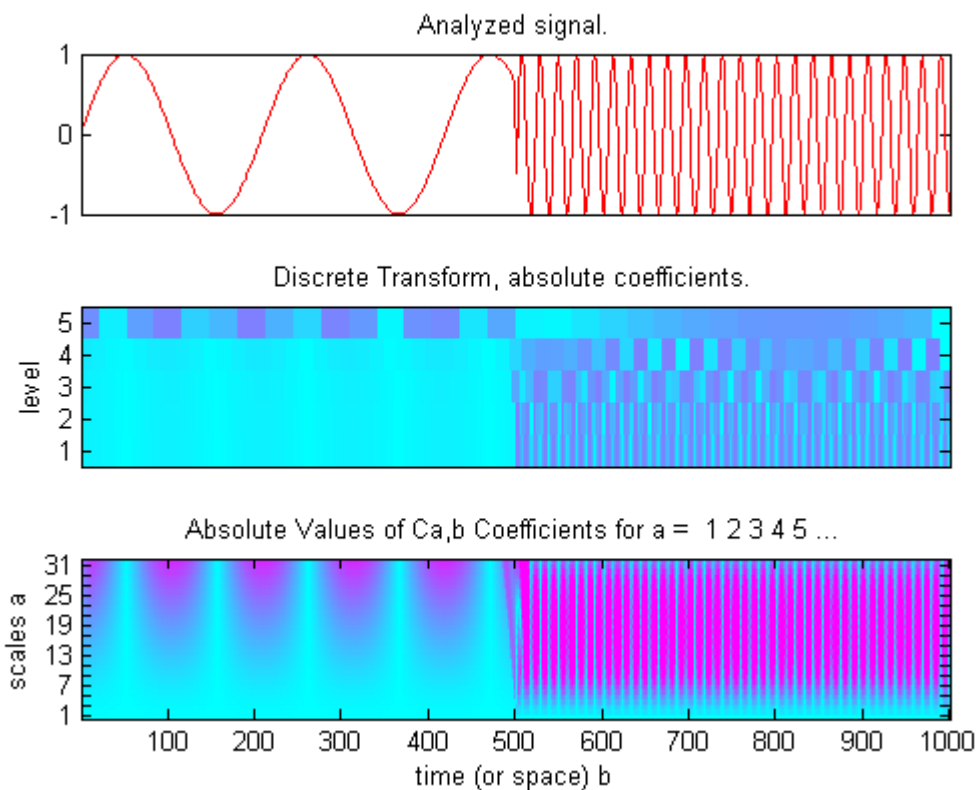


Figura 2: Transformadas de Wavelet discreta y continua

Transformada de Fourier

La transformada de Fourier, llamada así por Joseph Fourier, es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio el tiempo y la frecuencia, es decir, es reversible. Esta transformada surge como una adaptación y extensión de las series de Fourier, en las que funciones complicadas pero periódicas se escriben como la suma de ondas simples matemáticamente representados por senos y cosenos, para cuando el periodo de éstas tiende a infinito.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

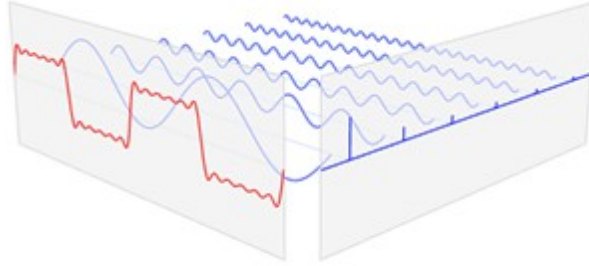


Figura 3: Transformada de Fourier

Sea f una función Lebesgue integrable:

$$f \in L^1(\mathbb{R})$$

La transformada de Fourier de f es la función

$$\mathcal{F}\{f\} : \xi \mapsto \hat{f}(\xi) := \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i \xi x} dx,$$

Esta transformada tiene muchas aplicaciones tanto en física como en ingeniería, como por ejemplo para obtener información que no es evidente en el dominio del tiempo pero sí en el de la frecuencia, como saber en qué banda de frecuencias se concentra la mayor energía en una señal. Otra de sus aplicaciones más empleadas es la de resolver ecuaciones diferenciales más fácilmente. También es ampliamente utilizada en el ámbito del tratamiento de imágenes digitales, como para tratar de definir más ciertas zonas en una imagen.

En el caso de una función periódica sobre el tiempo, la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamadas coeficientes de las series de Fourier. Estos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio temporal original. También, cuando una función de dominio temporal se muestrea para facilitar su almacenamiento o procesamiento mediante un ordenador, todavía resulta posible volver a crear una versión de la transformada de Fourier original con la fórmula de sumas de Poisson, también conocida como transformada de Fourier discreta.

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es una transformada integral ampliamente utilizada en matemáticas con muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Se trata de un operador lineal de una función $f(t)$ con un argumento real t , siendo $t \geq 0$, que transforma a la función $f(t)$ en una función $F(s)$ con el argumento complejo s . La transformación viene dada por la integral:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt.$$

Esta transformación es biyectiva para la mayoría de los usos prácticos. Los pares de $f(t)$ y $F(s)$ más comunes están a menudo en tablas predefinidas para facilitar su consulta, como puede verse en la tabla 1. La transformada de Laplace tiene la propiedad de que muchas relaciones y operaciones sobre la función original $f(t)$, se corresponden a relaciones y operaciones más simples sobre su imagen $F(s)$. [4] Esta transformada recibe su nombre de Pierre-Simon Laplace, quien la introdujo en su trabajo sobre la teoría de la probabilidad ("Théorie analytique des probabilités", 1812).

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

$f(t)$	$F(s)$
1	$\frac{1}{s}$
$u(t-a)$	$\frac{e^{-as}}{s}$
k cte.	$\frac{k}{s}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$ para $n \in \mathbb{Z}^+$
t^a	$\frac{\Gamma(a+1)}{s^{a+1}}$ para $a \in (-1, \infty)$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
$e^{at}t^n$	$\frac{n!}{(s-a)^{n+1}}$ para $n \in \mathbb{Z}$
$e^{kt}t^a$	$\frac{\Gamma(a+1)}{(s-k)^{a+1}}$ para $a \in (-1, \infty)$
$\sin(at)$	$\frac{a}{s^2+a^2}$
$\cos(at)$	$\frac{s}{s^2+a^2}$
$e^{at}\sin(bt)$	$\frac{b}{(s-a)^2+b^2}$
$e^{at}\cos(bt)$	$\frac{s-a}{(s-a)^2+b^2}$
$\sinh(at)$	$\frac{a}{s^2-a^2}$
$\cosh(at)$	$\frac{s}{s^2-a^2}$
$e^{at}\sinh(bt)$	$\frac{b}{(s-a)^2-b^2}$
$e^{at}\cosh(bt)$	$\frac{s-a}{(s-a)^2-b^2}$

Tabla 1: Conversiones típicas de $f(t)$ y $F(s)$

La transformada de Laplace está relacionada con la transformada de Fourier. Al igual que la transformada de Fourier, la transformada de Laplace se utiliza para la solución de ecuaciones diferenciales e integrales. En física e ingeniería se utiliza para el análisis de los sistemas no variantes linealmente en el tiempo, tales como circuitos eléctricos, osciladores armónicos, dispositivos ópticos y sistemas mecánicos. En este tipo de análisis, la transformada de Laplace es a menudo interpretada como una transformación desde el dominio del tiempo, en el que las entradas y salidas son funciones del tiempo, a la el dominio de la frecuencia, donde las mismas entradas y salidas son funciones de la frecuencia, en radianes por unidad de tiempo.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Dada una simple descripción matemática o funcional de una entrada o salida de un sistema, la transformada de Laplace proporciona una descripción funcional alternativa, que a menudo simplifica el proceso de analizar el comportamiento del sistema, o una síntesis de un nuevo sistema basado en un conjunto de especificaciones.

2.2.2. Transformadas bilineales

En álgebra, una forma bilineal sobre un espacio vectorial es una aplicación que asocia un escalar a cada par de vectores, tal que es lineal en cada uno de sus argumentos por separado. [5]

Dados un cuerpo K y un K -espacio vectorial V , una forma bilineal es una aplicación:

$$f : V \times V \rightarrow K$$

que verifica:

$$\begin{aligned} f(u_1 + u_2, v) &= f(u_1, v) + f(u_2, v) \\ f(u, v_1 + v_2) &= f(u, v_1) + f(u, v_2) \\ f(au, v) &= af(u, v) \\ f(v, au) &= af(u, v) \end{aligned}$$

para cualquier a perteneciente a K y u, u_1, u_2, v_1, v_2 pertenecientes a V .

Distribución de Wigner-Ville

Fue introducida por Eugene Wigner en 1932 para estudiar las correcciones cuánticas a la mecánica estadística clásica. El objetivo era vincular la función de onda que aparece en la ecuación de Schrödinger a una distribución de probabilidad en el espacio de la fase.

La distribución de Wigner $P(x, t)$ se define como:

$$P(x, p) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x+y)\psi(x-y)e^{2ipy/\hbar} dy$$

donde ψ es la función de onda y x y p son la posición y el momento, pero podrían ser cualquier par de variables conjugadas, es decir, partes real e imaginaria del campo eléctrico o la frecuencia y tiempo de una señal.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

La transformada de Wigner es una transformación general invertible de un operador \hat{G} en un espacio de Hilbert para una función $g(x, p)$ en el espacio de la fase, y está dada por:

$$g(x, p) = \int_{-\infty}^{\infty} ds \, e^{ips/\hbar} \langle x - \frac{s}{2} | \hat{G} | x + \frac{s}{2} \rangle.$$

La distribución de Wigner-Ville tiene un amplio uso dentro del estudio de la mecánica cuántica. También está relacionada con la mecánica clásica, en concreto con las posiciones y momentos de las partículas. La función de Wigner permite estudiar el límite clásico, que ofrece una comparación de la dinámica clásica y cuántica en el espacio de la fase. También tiene aplicaciones en el modelado de sistemas ópticos, como telescopios, dispositivos de telecomunicaciones de fibra, óptica de pulsos láser, óptica cuántica y en el análisis de señales.

3. Marte

Marte, también llamado el planeta rojo debido a la tonalidad rojiza (producida por el óxido de hierro) de su superficie, ocupa la cuarta posición desde el Sol. Le orbitan dos lunas. Fobos, la más grande y cercana a Marte, mide unos 23 km de diámetro. Deimos mide aproximadamente unos 13 km y se encuentra a mas del doble de distancia de Marte que Fobos. Debido al reducido tamaño de ambos satélites se cree que éstos son asteroides que fueron capturados por la gravedad del planeta. Ambos satélites fueron descubiertos en 1877 por Asaph Hall.



Figura 4: Imagen de Marte

El núcleo es probable que sea solido actualmente, y debido a su menor tamaño y distancia al Sol mayor que la tierra, también mas frio. El hecho de que su núcleo se encuentre en este estado, también explica la casi ausencia de un campo magnético como el terrestre, que se genera por la rotación de la masa magmática del núcleo exterior, compuesta por hierro fundido, alrededor del núcleo central.

3.1. La atmósfera

La atmósfera de Marte es muy tenue, con una presión superficial de sólo 7 a 9 hPa frente a los 1013 hPa de la atmósfera terrestre. Esto representa una centésima parte de la terrestre. La presión atmosférica varía considerablemente con la altitud, desde casi 9 hPa en las depresiones más profundas, hasta 1 hPa en la cima del Monte Olimpo. Su composición es fundamentalmente: dióxido de carbono (95,3%) con un 2,7% de nitrógeno, 1,6% de argón y trazas de oxígeno molecular (0,15%) monóxido de carbono (0,07%) y vapor de agua (0,03%). La proporción de otros elementos es ínfima y escapa su dosificación a la sensibilidad de los instrumentos hasta ahora empleados. El contenido de ozono es 1000 veces menor que en la Tierra, por lo que esta capa, que se encuentra a 40 km de altura, es incapaz de bloquear la radiación ultravioleta.

Uno de los factores que ha influido en la pequeña presión atmosférica es el valor de la gravedad, que es aproximadamente un tercio del valor terrestre. A diferencia de la Tierra, en Marte hay una gran variación de temperatura del día a la noche debido a la baja densidad de la atmósfera y la ausencia de océanos. Desde las observaciones de la misión Viking se conoce que hay tres ciclos anuales que determinan el clima de Marte y que son el ciclo del CO₂, el ciclo del H₂O y el del polvo, que a su vez están acoplados. La característica fundamental del ciclo de CO₂ es que, de acuerdo con las estaciones, se produce la condensación y sublimación en las regiones polares de un 25% de la masa total atmosférica. Este ciclo está controlado por la capacidad radiactiva a altas latitudes. El ciclo del agua ha sido observado mediante el estudio de la evolución del vapor de agua en la atmósfera.

Los vientos y tormentas de polvo, locales y globales, son otros mecanismos relevantes que contribuyen a configurar la atmósfera y superficie marcianas. La atmósfera es lo bastante densa como para albergar vientos muy fuertes y grandes tormentas de polvo que, en ocasiones, pueden abarcar el planeta entero durante meses. Este viento es el responsable de la existencia de dunas de arena en los desiertos marcianos.



Figura 5: Dust devil en Marte fotografiado por el rover Spirit

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Las nubes pueden presentarse en tres colores: blancas, amarillas y azules. Las nubes blancas son de vapor de agua condensada o de dióxido de carbono en latitudes polares. Las amarillas, de naturaleza pilosa, son el resultado de las tormentas de polvo y están compuestas por partículas de tamaño en torno a 1 micra. La bóveda celeste marciana es de un suave color rosa salmón debido a la dispersión de la luz por los granos de polvo muy finos procedentes del suelo ferruginoso [6].

En la tabla 2 se pueden observar las principales características y diferencias entre la Tierra y Marte:

Magnitud	Marte	La Tierra
Masa	0.64×10^{24} Kg.	5.80×10^{24} Kg.
Diámetro	6794 Km.	12756 Km.
Densidad media	3.9 g/cm ³	5.5 g/cm ³
Gravedad	3.73 m/s ²	9.81 m/s ²
Inclinación de la órbita	1.85°	0.00
Excentricidad	0.09	0.02
Inclinación del Eje	25.19°	23.93°
Distancia media al Sol	227.9×10^6 Km.	149.6×10^6 Km.
Rotación	24.623 h. (1 sol)	23.934 h.
Traslación	687 días Tierra 667 días Marte	365.256 días
Temperatura media en la superficie	-55. C	15. C
Presión atmosférica media en la superficie	5.6 mb	1013 mb
Satélites	Fobos y Deimos	Luna

Tabla 2: Comparación de características Tierra/Marte

En invierno, en las latitudes medias, el vapor de agua se condensa en la atmósfera y forma nubes ligeras de finísimos cristales de hielo. En las latitudes extremas, la condensación del anhídrido carbónico forma otras nubes que constan de cristales de nieve carbónica.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

La débil atmósfera marciana produce un efecto invernadero que aumenta la temperatura superficial unos 5 grados; mucho menos que lo observado en Venus y en la Tierra.

En los inicios de su historia, Marte pudo haber sido muy parecido a la Tierra. Al igual que en nuestro planeta la mayoría de su dióxido de carbono se utilizó para formar carbonatos en las rocas. Pero al carecer de una tectónica de placas es incapaz de reciclar hacia la atmósfera nada de este dióxido de carbono y así no puede mantener un efecto invernadero significativo.

No hay cinturón de radiación, aunque sí hay una débil ionosfera que tiene su máxima densidad electrónica a 130 km de altura.

Aunque no hay evidencia de actividad volcánica actual, recientemente la nave europea Mars Express y medidas terrestres obtenidas por el telescopio Keck desde la Tierra han encontrado trazas de gas metano en una proporción de 10 partes por 1000 millones. Este gas sólo puede tener un origen volcánico o biológico. El metano no puede permanecer mucho tiempo en la atmósfera; se estima en 400 años el tiempo en desaparecer de la atmósfera de Marte, ello implica que hay una fuente activa que lo produce.

4. Origen de los datos

En esta sección se repasará las características y desarrollo de la misión Pathfinder, enviada a Marte para obtener datos de primera mano y de incalculable valor, para conocer las características geográficas y atmosféricas, entre otras de interés, del planeta rojo.

También se explicará el formato y contenido de los archivos de datos que se recogieron durante esta misión, ya que posteriormente, se emplearán estos datos como entradas para tratar de detectar dust devils, por lo que se debe tener claro con que se está trabajando.

A principios de la década de 1960 se enviaron las primeras sondas espaciales a Marte. Desde entonces más de treinta naves han realizado misiones con éxito, ya sea sobrevolando el planeta, orbitando a su alrededor o recorriendo el terreno. Las primeras sondas enviadas nos ofrecieron imágenes mas cercanas y detalladas de Marte. Las siguientes ya hicieron estudios mas detallados, como las Vikings 1 y 2. Éstas aterrizaron a mediados de 1976. Fotografiaron la zona de aterrizaje, estudiaron la atmósfera, analizaron muestras de la superficie y buscaron señales de vida, sin éxito en esto último.

4.1. Misión pathfinder

La Mars Pathfinder [7] fue la primera de una serie de misiones a Marte que incluyen rovers (vehículos robóticos de exploración). Esta misión a Marte fue la más importante desde que las Viking aterrizaran sobre el planeta rojo en 1976.

La Mars Pathfinder fue lanzada el 4 de diciembre de 1996 a bordo de un cohete Delta, un mes después del lanzamiento del Mars Global Surveyor y luego de 7 meses de viaje llegó a Marte el 4 de julio de 1997. El sitio de aterrizaje es Ares Vallis (Valle de Marte) en una región llamada Chryse Planitia (Planicies de Oro). Durante el viaje la nave realizó cuatro correcciones de vuelo: el 10 de enero, 3 de febrero, 6 de mayo y 25 de junio. El lander se abrió exponiendo al rover llamado Sojourner (en honor a la famosa abolicionista estadounidense Sojourner Truth) que realizaría diferentes experimentos en la superficie marciana.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

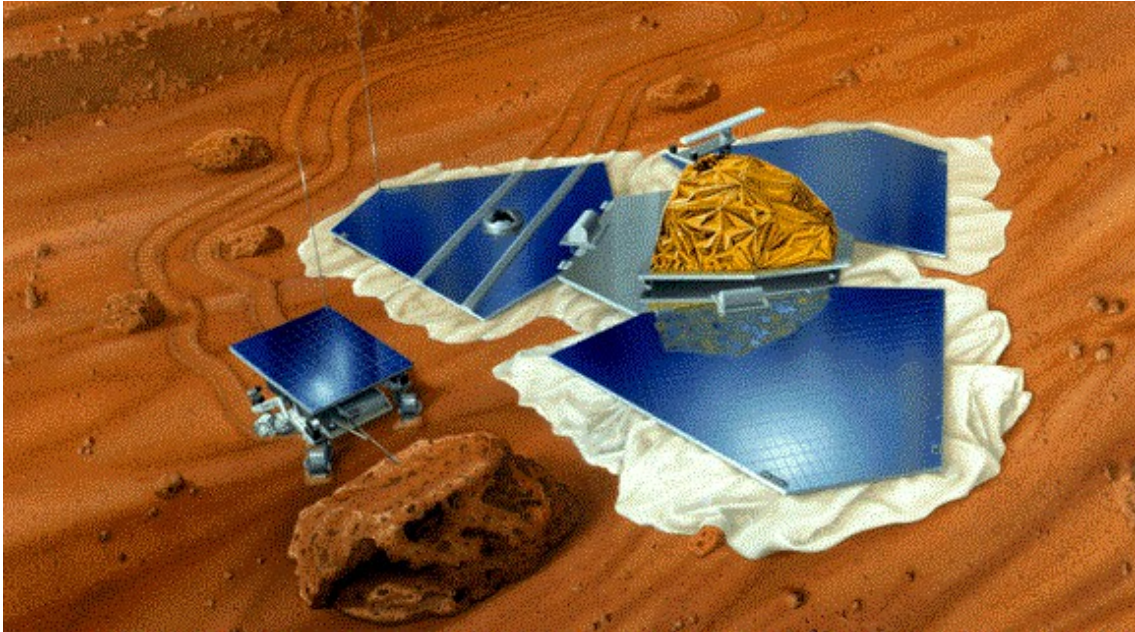


Figura 6: Ilustración del rover y sonda de la misión Pathfinder

La misión Mars Pathfinder llevó un conjunto de instrumentos científicos para analizar la atmósfera marciana, el clima, geología y la composición de las rocas y el suelo. El proyecto fue el segundo del programa Discovery de la NASA, el cual promueve el envío de naves de bajo costo y de lanzamientos frecuentes bajo la premisa “más barato, más rápido y mejor” sostenida por su administrador Daniel Goldin. La misión fue dirigida por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), una división del Instituto de Tecnología de California ("CalTech"), responsable del Programa de Exploración a Marte de la NASA.

Objetivos de la misión Mars Pathfinder

Probar que es posible el desarrollo de naves “más rápidas, mejores y más baratas” (con tres años para el desarrollo y con un costo inferior a los US\$150 millones).

Demostrar que es posible enviar una carga de instrumentos científicos a otro planeta con un sistema simple y a un quinto del valor de una misión Viking.

Mostrar el compromiso de la NASA con la exploración planetaria de bajo costo al completar la misión con un valor total de US\$280 millones, incluyendo el vehículo de lanzamiento y las operaciones de misión.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Operación de la misión

La Mars Pathfinder realizó diferentes investigaciones sobre el suelo marciano a través de tres instrumentos científicos. La plataforma de aterrizaje contenía una cámara estereoscópica con filtros especiales en un mástil extensible llamado Sistema de Imágenes del Mars Pathfinder o Imager for Mars Pathfinder (IMP) y el Instrumento de la Estructura Atmosférica / Módulo de Meteorología (Atmospheric Structure Instrument / Meteorology Package (ASI /MET)) que actúa como una estación meteorológica de Marte, recogiendo datos sobre la presión, temperatura y vientos.

El rover Sojourner disponía de un Espectro de rayos X Alfa Protón (APXS), utilizado para el análisis de la composición de las rocas y el suelo. El rover también tenía dos cámaras en blanco y negro y una cámara en color. Estos instrumentos permitían realizar investigaciones geológicas de la superficie desde sólo unos milímetros hasta cientos de metros, así como investigar la geoquímica e historia evolutiva de la superficie y las rocas y las propiedades magnéticas y mecánicas del terreno, además de las propiedades magnéticas del polvo, la atmósfera y la dinámica rotacional y orbital marcianas.

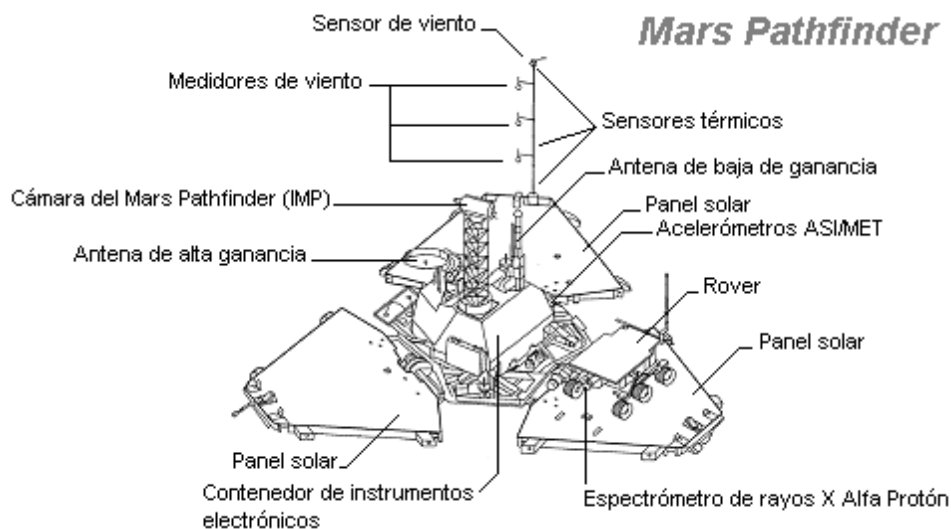


Figura 7: Instrumentos de la sonda Pathfinder

Objetivos científicos de la Mars Pathfinder

- Morfología superficial y geología a escala métrica.
- Petrología y geoquímica de los materiales superficiales.
- Propiedades magnéticas y mecánicas de la superficie.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

- Estructura atmosférica, además de variaciones meteorológicas diurnas y nocturnas.
- Dinámica rotacional y orbital de Marte.

Fin de la misión

Aunque la misión estaba programada para durar un mes y una semana, estos límites fueron excedidos por 3 veces y 12 veces respectivamente. El contacto final con la Pathfinder fue a las 10:23 UTC del 27 de septiembre de 1997. aunque los planificadores de la misión trataron de restablecer contacto durante los siguientes cinco meses, la exitosa misión fue dada por terminada el 10 de marzo de 1998. Después del aterrizaje, la Mars Pathfinder fue renombrada como la Sagan Memorial Station en honor al famoso astrónomo y planetólogo Carl Sagan. En total, la misión excedió en pocos días las metas establecidas.

4.2. Datos recogidos

Para las pruebas se utilizaran los datos reales recogidos por la sonda Mars Pathfinder. Estos datos están a disposición de quien los necesite a través de la pagina de la NASA: http://atmos.nmsu.edu/PDS/data/mpam_0001/surf_rdr/scidata/.

Los archivos con los datos se encuentran repartidos en los ficheros que pueden verse en la figura 8. Todos los directorios menos el primero y último contienen cien sesiones de medidas. Esto es porque las primeras medidas fueron tomadas antes de aterrizar, y las ultimas finalizaron antes de llegar a las cien.

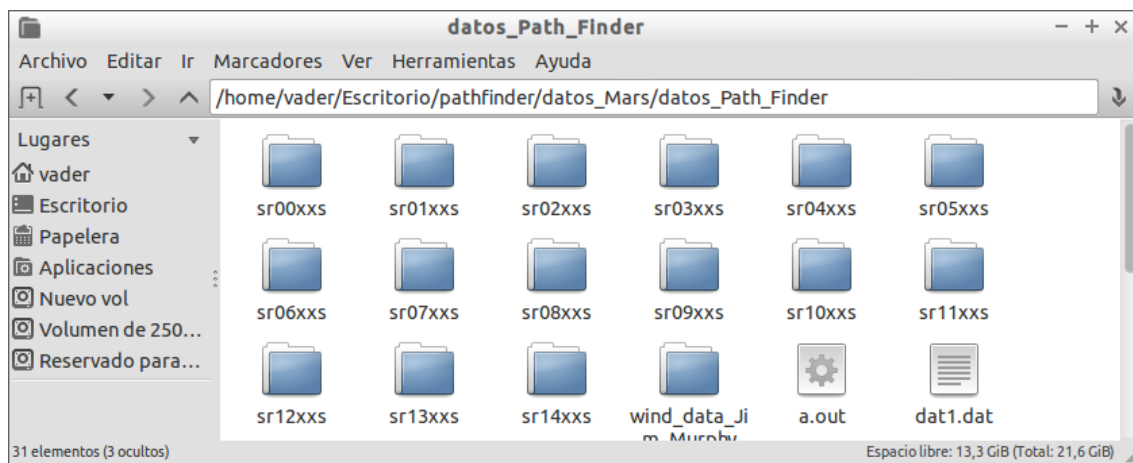


Figura 8: Organización de los ficheros de datos

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

El aspecto interior de estos ficheros puede verse en la figura 9. Como se ve existen ficheros con el mismo nombre pero distinta extensión de archivo. Los ficheros .lbl contienen información y descripciones detalladas a modo de cabeceras de cada uno de los campos que se encuentran en los ficheros .tab, los cuales contienen los valores recogidos por los distintos sensores de la sonda.

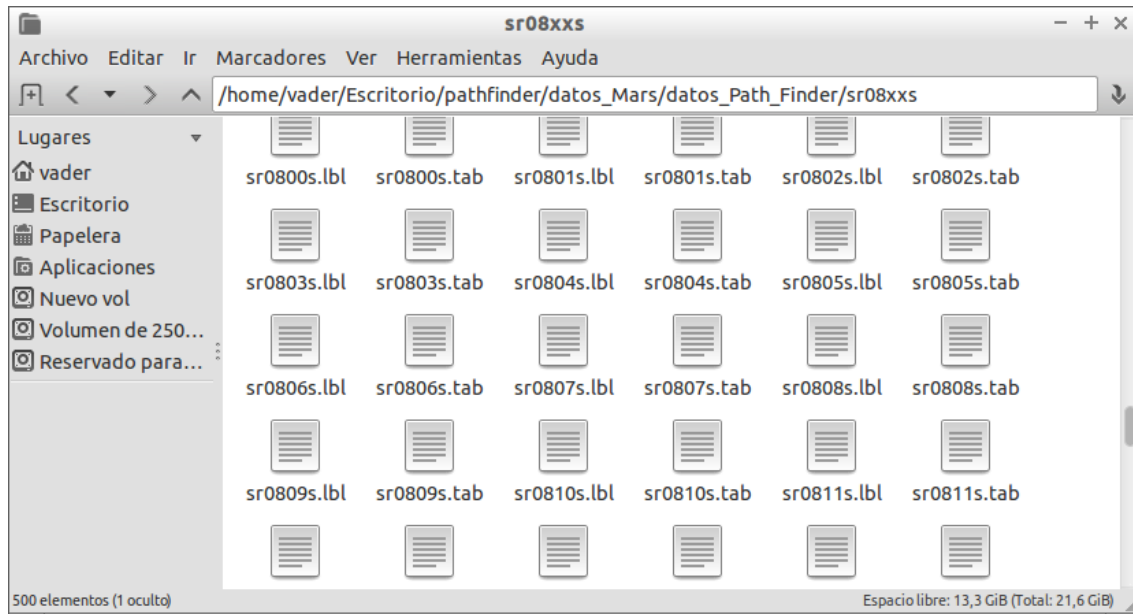


Figura 9: Ejemplo del interior de un fichero

Los datos recogidos por la sonda muestran el siguiente formato:

C:\Users\wader\Desktop\mars\imgs\sr0810s.tab - Notepad++ [Administrator]

File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?

Tomog_filter_dust.m... tomog_data_1apack.c... tomogram.bt... U.bt... dustdevil.bt... sr0810s.tab sr0810s.bl...

1		810	46	184.0	4.0	36.0	4.0	2	12.0	156.0	1248541730.000	153.41631						
2	21	13	44	30.159	259.22	262.28	265.60	260.99	6.6290	6.6301	259.84	263.82	263.10	262.87	259.63	258.20	1248541730.000	0
3	21	13	44	34.052	259.42	262.61	266.28	260.70	6.6275	6.6301	258.75	263.27	263.21	262.76	260.07	257.87	1248541734.000	0
4	21	13	44	37.946	259.40	262.50	265.99	261.44	6.6285	6.6301	259.40	263.27	263.21	262.76	260.18	258.41	1248541738.000	0
5	21	13	44	41.839	261.43	264.82	267.83	265.66	6.6263	6.6279	288.53	285.43	293.46	290.49	292.89	285.85	1248541742.000	1
6	21	13	44	45.732	259.46	262.91	266.15	263.86	6.6261	6.6286	276.87	279.69	292.13	288.89	286.54	274.91	1248541746.000	1
7	21	13	44	49.626	259.85	263.21	266.64	264.31	6.6253	6.6264	284.99	284.77	293.24	290.00	291.13	282.43	1248541750.000	1
8	21	13	44	53.519	260.40	263.90	267.53	264.49	6.6243	6.6264	285.34	286.36	293.55	290.31	291.00	283.00	1248541754.000	1
9	21	13	44	57.412	259.33	263.67	267.19	264.00	6.6236	6.6250	285.47	284.99	293.64	290.22	292.35	283.00	1248541758.000	1
10	21	13	45	1.306	260.84	264.31	267.71	265.55	6.6211	6.6228	288.97	288.54	294.57	291.64	292.53	286.34	1248541762.000	1
11	21	13	45	5.199	259.85	263.12	265.79	264.23	6.6229	6.6255	285.08	284.64	293.99	290.89	292.17	282.30	1248541766.000	1
12	21	13	45	9.093	259.39	263.35	266.13	263.94	6.6231	6.6255	283.57	284.81	293.46	290.22	290.82	281.20	1248541770.000	1
13	21	13	45	12.986	258.26	262.40	264.68	263.08	6.6211	6.6233	281.80	282.12	293.50	289.87	291.77	279.63	1248541774.000	1
14	21	13	45	16.880	259.33	263.34	266.46	263.90	6.6209	6.6233	284.50	287.83	293.24	290.58	289.29	282.83	1248541778.000	1
15	21	13	45	20.773	259.89	263.23	266.22	263.74	6.6189	6.6233	282.64	285.08	293.10	290.18	290.28	280.24	1248541782.000	1
16	21	13	45	24.666	259.30	263.56	266.99	261.47	6.6181	6.6219	280.61	288.98	292.75	291.02	284.79	279.80	1248541786.000	1
17	21	13	45	28.560	259.68	262.97	266.34	262.21	6.6189	6.6219	285.56	292.05	293.73	291.95	286.77	285.15	1248541790.000	1
18	21	13	45	32.453	259.09	260.68	264.75	261.20	6.6189	6.6204	282.51	290.53	292.84	291.24	283.94	281.91	1248541794.000	1
19	21	13	45	36.346	258.89	261.91	265.03	261.69	6.6184	6.6211	284.06	292.13	293.59	291.77	284.65	283.40	1248541798.000	1

Figura 10: Formato de los datos

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

La NASA nos proporciona estos ficheros tal y como se obtuvieron. Para un manejo más sencillo de los datos, ya que se encuentran repartidos en varios directorios los ficheros que los contienen, y hay información de un mismo sol repartida en varios ficheros que pueden estar en directorios diferentes, se ha realizado un programa para extraer los datos que nos serán de utilidad y guardarlos en ficheros, con el fin de una mejor organización y manejo mas sencillo de los mismos. En concreto se generará un fichero con los datos recogidos en cada sol, es decir el fichero 1.dat tendrá todos los datos que la sonda recogió en el sol 1. En la figura 11 puede verse el aspecto final después del procesado de los ficheros:

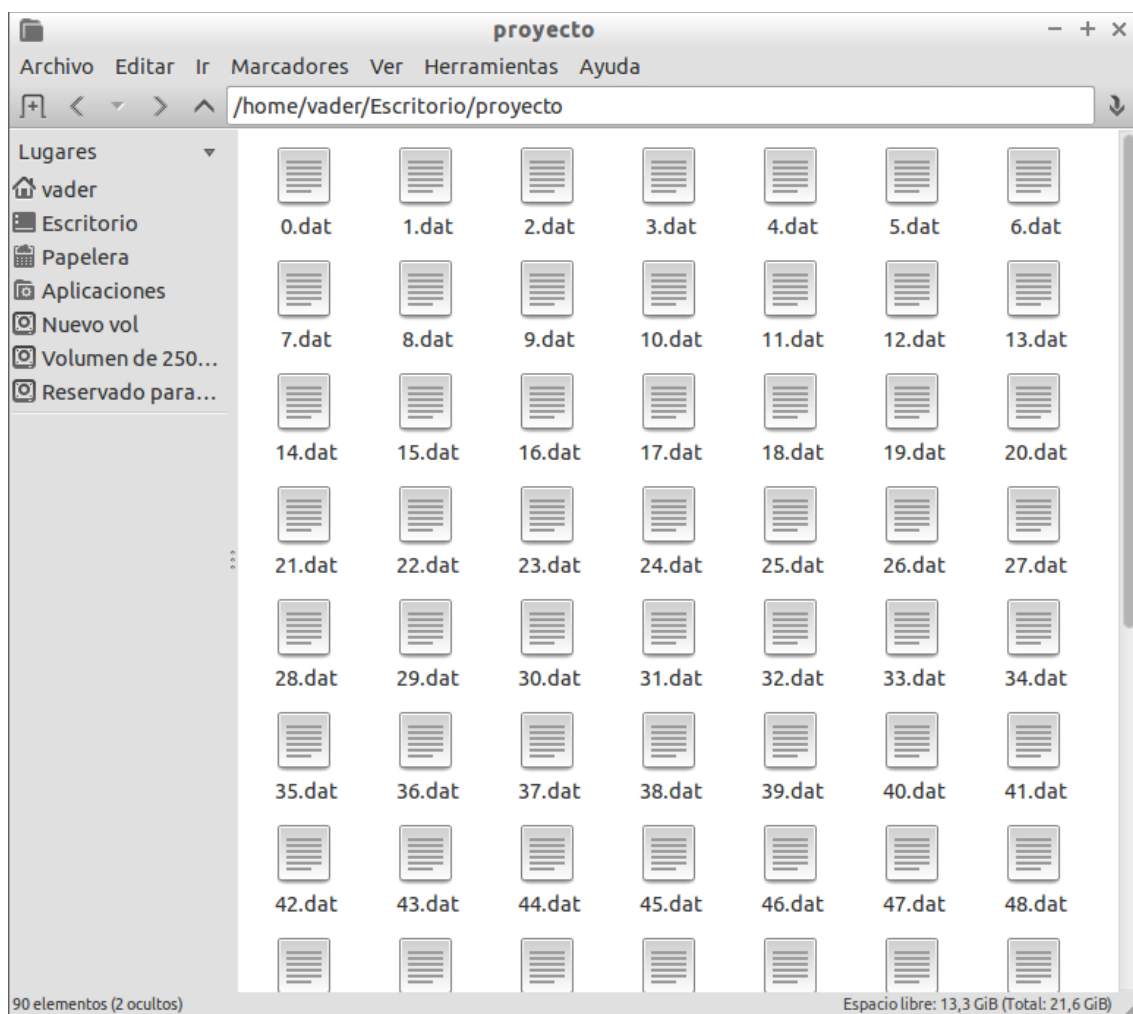


Figura 11: Aspecto tras la extracción de los datos

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

En total hay datos hasta el sol 83. Por otro lado también se elimina la primera fila, que contiene la siguiente información:

- El número de sesión del fichero actual.
- El número de datos recibidos.
- El tamaño en segundos de la parte de la sesión tomando datos.
- Intervalo medio de ciencia.
- Intervalo medio de limpieza
- Tiempo transcurrido en segundos entre capturar las 24 medidas.
- Modo de operación del sensor de viento.
- Tiempo transcurrido en segundos entre el paso del modo de baja a alta potencia del sensor de viento.
- Tiempo transcurrido en segundos entre el paso del modo de alta a baja potencia del sensor de viento.
- Contador cuando la sesión comenzó.
- Longitud solar al comienzo de la sesión.

Los datos de las siguientes filas se corresponden en el orden que aparecen a:

- Sol.
- Hora.
- Minutos.
- Segundos.
- Temperatura recogida por el termopar superior del mástil.
- Temperatura recogida por el termopar intermedio del mástil.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

- Temperatura recogida por el termopar inferior del mástil.
- Temperatura del termopar situado bajo el mástil.
- Presión en un rango de 6 a 10 milibares.
- Presión en un rango de 0 a 12 milibares.
- Temperatura del sensor situado en el primer segmento de sensor de viento.
- Temperatura del sensor situado en el segundo segmento del sensor de viento.
- Temperatura del sensor situado en el tercer segmento del sensor de viento.
- Temperatura del sensor situado en el cuarto segmento del sensor de viento.
- Temperatura del sensor situado en el quinto segmento del sensor de viento.
- Temperatura del sensor situado en el sexto segmento del sensor de viento.
- Reloj de la nave.
- Indicador de potencia del sensor de viento.

El programa de extracción de datos “extract.c” puede verse en el anexo A.

5. Análisis mediante algoritmo disparadores

Resulta intuitivo que debido a que las entradas son datos ordenados en el dominio del tiempo, los métodos de dominio en el tiempo serán consecuentemente menos complejos y más adecuados para abordar el problema.

Como se vio anteriormente ningún algoritmo resultó claramente óptimo bajo todas condiciones de distintas fuentes, receptores, y ruido, el algoritmo STA / LTA fue el que mejor respondía a las exigencias de un sistema de detección y localización de eventos basado en la correlación y procesamiento de los flujos de datos, es en el que se centrara esta parte del proyecto.

Procesado en dominio del tiempo

El algoritmo STA / LTA evalúa la relación entre el cuadrado de la densidad de energía a corto y largo plazo. Los tamaños óptimos de ventana dependen de la frecuencia del contenido de la señal sísmica, por ejemplo para señales de banda ancha, aproximadamente 20 muestras/segundo, se obtiene un rendimiento razonable con un tamaño de ventana de 3 y 24 segundos, es decir, el número de muestras para calcular la densidad a corto plazo (NSTA) sería de 60 datos, y para la densidad a largo plazo (NLTA) sería de 480 datos.

$$STA_i = \frac{x_i^2 - x_{i-Nsta}^2}{Nsta} + STA_{i-1},$$
$$LTA_i = \frac{x_{i-Nsta-1}^2 - x_{i-Nsta-Mlta-1}^2}{Mlta} + LTA_{i-1}$$

La salida de del algoritmo STA / LTA se muestra en la parte inferior de la figura 12. La parte superior se corresponde con el sismograma sobre el cual se aplica el algoritmo:

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

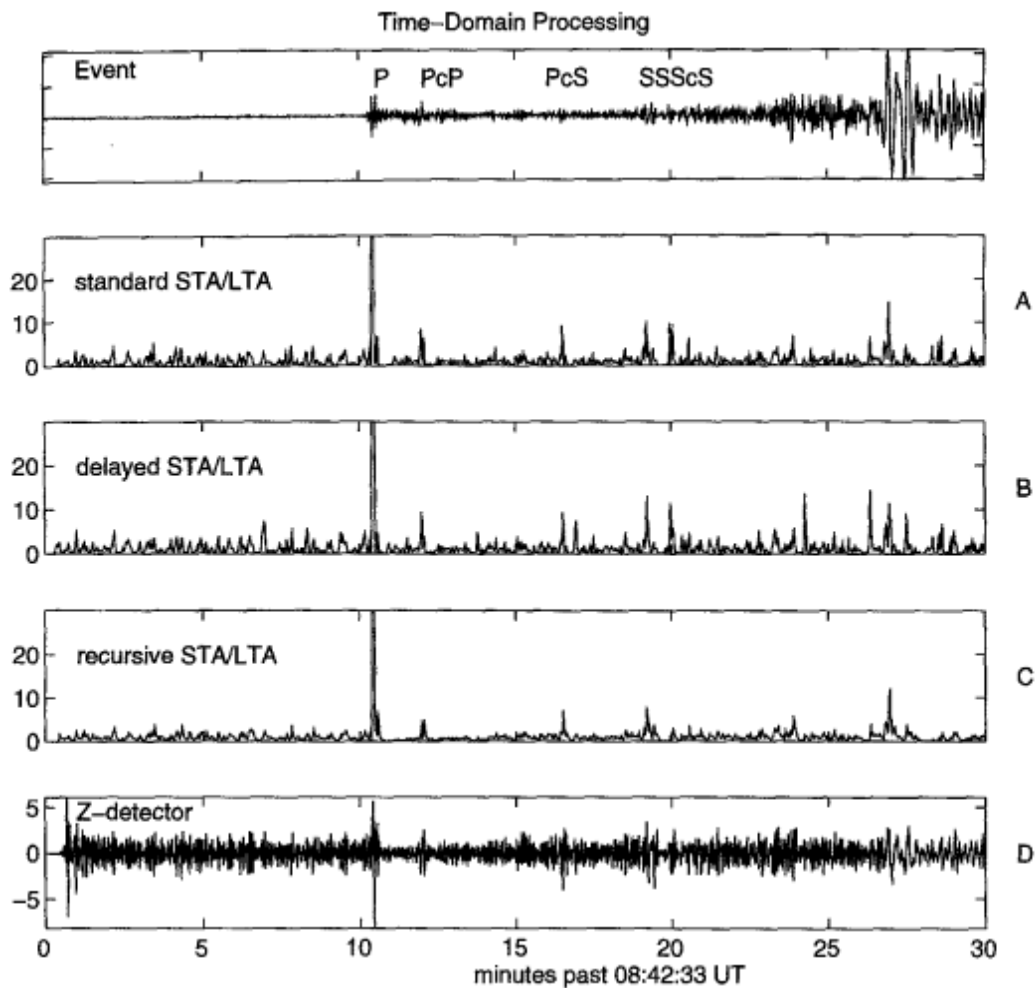


Figura 12: Salidas de algoritmos detectores de fase

Se puede obtener una mejor aproximación a la independencia estadística entre las dos variables añadiendo un retardo a una de ellas. En la tercera gráfica de la figura 12 podemos observar la salida con un retardo de 100 muestras. Este método fue utilizado por Ruud y Husebye (1992) y también como disparador por L. Powell (1995) en un sistema portátil de adquisición de datos desarrollado en el Universidad de Wisconsin. La mayor independencia estadística de las muestras con retraso permite que tamaños de ventana menores y en consecuencia tiene menor costo computacional, por contrapartida los tamaños de ventana menores, causan una mayor variabilidad en la salida del algoritmo.

También se puede recurrir a una implementación recursiva de este algoritmo. Esto produce una bajada exponencial a la respuesta frente a un impulso, lo que hace que se recupere más rápidamente de transitorios de energías elevadas. Por otro lado, también

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

produce valles de menor tamaño en la salida. El tiempo requerido para que la respuesta al impulso vuelva a su valor original, T, se encuentra integrado dentro de la constante de decaimiento, C:

$$STA_i = Cx_i + (1 - C)STA_{i-1}$$
$$C = 1 - e^{-S/T}$$

donde S son los segundos por muestra. También es común el uso de $C = 1/Nsta$ y $C = 1/Nlta$ para las constantes de decaimiento. La salida de este algoritmo se muestra en la Figura 12-c.

A la hora de aplicar el algoritmo STA/LTA sobre las muestras recogidas por la sonda Pathfinder, se debe tener en cuenta las características propias de los datos. Por ejemplo la velocidad de muestreo es aproximadamente de 0.25muestras/segundo, es decir una muestra cada cuatro segundos. También es habitual encontrar saltos temporales, dentro de una misma sesión de recogida de datos, superiores incluso a los 10 minutos. Como consecuencia de esto, la siguiente medida no estará relacionada con todas las anteriores, ya que en ese periodo de tiempo sin muestras la climatología puede haber sufrido fuertes cambios, y nos produciría un falso positivo.

De igual modo se deberá tener en cuenta la sensibilidad del sensor de presión, ya que no si la señal presenta pequeños picos deberemos ignorarlos y solo quedarnos con aquellos realmente útiles para la detección.

Todas las características expuestas de los datos se tendrán que tener en cuenta a la hora de implementar y controlar el algoritmo detector. La implementación del algoritmo STA/LTA utilizado para la detección de dust devils puede encontrarse en el anexo A.

6. Análisis mediante tomografía

Los tomogramas de tiempo-frecuencia[8] se han utilizado para la eliminación de ruido y la separación de componentes de señales finitas en el tiempo. Estos tomogramas de tiempo-frecuencia son particularmente apropiados para identificar el despliegue de las características de la frecuencia de las señales. Por ejemplo, el éxito en la separación de los componentes en las aplicaciones de reflectometría de plasma.

En particular, si en la combinación lineal $B(\mu, \nu) = \mu T + \nu O$, uno elige un operador O , que sea acorde a las características de la señal que uno quiere extraer, a continuación, mediante la búsqueda de los valores particulares del conjunto (μ, ν) donde los efectos de ruido se podrían anular, podemos separar la información de señales muy pequeñas del gran ruido y también obtener información fiable sobre la estructura temporal de la señal. Esto proporciona una técnica de filtrado de señales adaptada. La construcción del operador adecuado para una señal en particular puede ser realizada mediante las mismas técnicas que se utilizan en la descomposición biortogonal.

El método para la construcción del par de operadores adaptados es el siguiente:

Considere un conjunto de secuencias de tiempo N -dimensionales $\{x_1, \dots, x_k\}$, típico de la señal se quiere detectar. Estas secuencias pueden ser considerados como los patrones que, más tarde, se desean detectar en una señal ruidosa. Se genera la matriz $k \times N$, $U \in M_{k \times N}$:

$$U = \begin{pmatrix} x_1(1\Delta t) & x_1(2\Delta t) & \dots & x_1(N\Delta t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_k(1\Delta t) & x_k(2\Delta t) & \dots & x_k(N\Delta t) \end{pmatrix}$$

con $k < N$ normalmente.

A continuación se construyen las matrices cuadradas $A = U^T U \in M_{N \times N}$ y $B = U U^T \in M_{k \times k}$. La diagonalización de A proporciona k autovalores distintos de cero $(\alpha_1, \dots, \alpha_j)$ y su correspondientes autovectores ortogonales N -dimensionales (Φ_1, \dots, Φ_k) , $\Phi_j \in R^N$. De igual forma, la diagonalización de B proporcionaría los mismos k autovalores y autovectores (Ψ_1, \dots, Ψ_k) con $\Psi_j \in R^k$. Si es necesario, uno puede obtener, por el método de Gram-Schmidt, los restantes $N - k$ autovectores para abarcar R^N , que en este contexto se asocia al autovalor cero.

El operador lineal S construido a partir de un conjunto de señales típicas es:

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

$$S = \sum_{i=1}^k \alpha_i \Phi_i \Phi_i^t$$

donde $S \in M_{N \times N}$.

Para el tomograma consideramos un operador $B(\mu, \nu)$ de la forma:

$$B(\mu, \nu) = \mu t + \nu S = \mu \begin{pmatrix} 1\Delta t & & & \\ & 2\Delta t & & \\ & & 3\Delta t & \\ & & & \ddots \\ & & & & N\Delta t \end{pmatrix} + \nu \sum_{i=1}^k \alpha_i \Phi_i \Phi_i^t$$

donde $B \in M_{N \times N}$.

Los autovectores de cada $B(\mu, \nu)$ son las columnas de la matriz que los diagonaliza. De las proyecciones de una señal en estos autovectores uno construye un tomograma adaptado al par de operadores (t, S) .

6.1. Ejemplos

A continuación se presentaran algunos ejemplos de la aplicación de la técnica descrita anteriormente.

En el primer ejemplo se generan un conjunto de 40 señales aleatorias con pulsos de duración $\Delta t = 10$ y intensidades 1 o -1. La longitud total de la señal es de 200 unidades de tiempo. Estas señales aleatorias forman los datos típicos a los que vamos a adaptar el tomograma, construyendo el operador S .

La figura 13 muestra 10 señales de este tipo. Todas ellos varían entre 1 y -1, estando desplazadas en la figura para una mayor claridad.

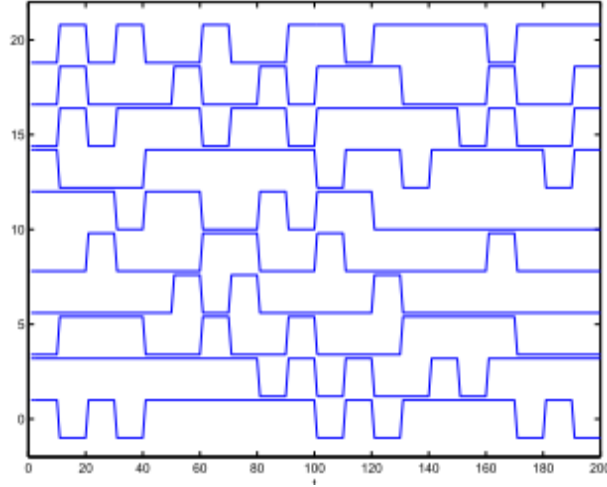


Figura 13: Señales tipo para adaptar el tomograma

Una vez que el operador S se ha construido, se considera el operador

$$B(\theta) = t \cos \theta + S \sin \theta$$

para el que se calculan los autovalores que se utilizan para proyectar las señales a analizar. A una señal del mismo tipo que las utilizadas para construir el operador S (en el panel superior izquierdo de la figura 2), le añadimos ruido gaussiano (Panel superior derecho de la figura 2). A continuación se analiza esta señal y se construye un tomograma para 20 valores diferentes de θ en intervalos de $\Delta\theta = \pi/40$. En la parte inferior izquierda de la figura 2 se muestra una gráfica de contorno o de curvas de nivel del tomograma. Mediante la inspección de la distribución de potencia en el tomograma uno puede seleccionar los componentes de una intensidad mayor que un umbral para la eliminación del ruido de toda la señal, o seleccionar componentes particulares de la señal. En este caso lo que interesa es seleccionar la parte de la señal que corresponde a la señal típica utilizada para construir S . Esto se realiza mediante la selección de sólo los componentes más fuertes de la región donde más se concentran. En la parte inferior derecha de la figura 14 mostramos el resultado de la proyección de los vectores propios 185-200 en $\theta = 19\pi/40$.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

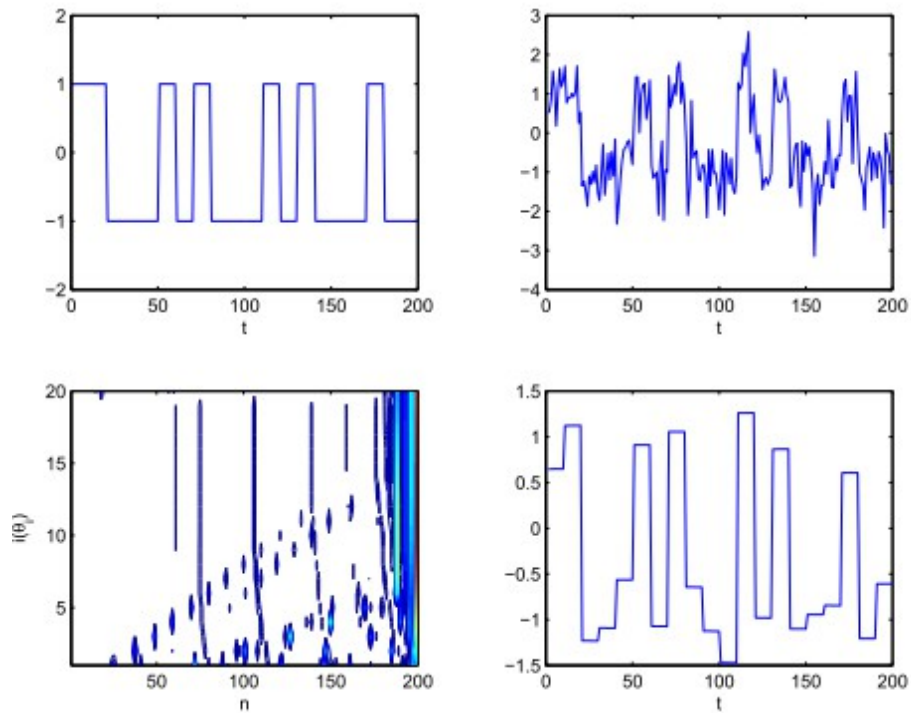


Figura 14: Procesado mediante tomografía. Ejemplo 1

Se ve que la señal se reconstruye razonablemente bien a partir de la entrada con ruido. Si se recortara la señal superiormente en 0.5 e inferiormente en -0.5 puede observarse que la reconstrucción sería perfecta.

Para el segundo ejemplo se han generado como señales típicas, un conjunto de 40 senos con frecuencias aleatorias. Fig. 15 muestra algunos ejemplos.

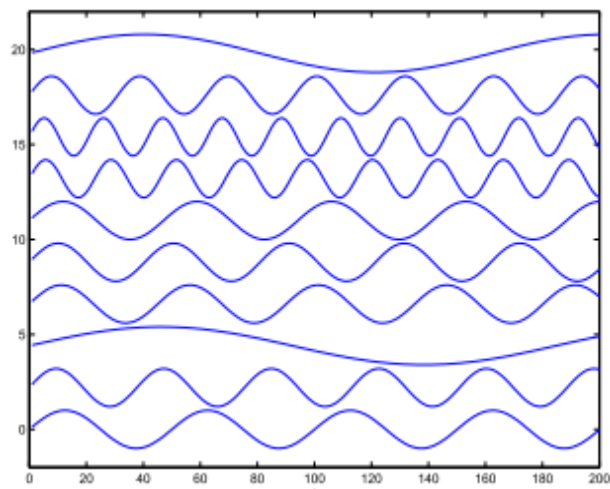


Figura 15: Señales típicas para el ejemplo 2

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Este caso es más difícil porque se puede esperar que el ruido contenga frecuencias similares a las señales típicas. La figura 16 muestra los resultados de un típico análisis de una señal que contiene senos en diferentes intervalos de tiempo. En el panel superior izquierdo esta la señal, en el panel superior derecho la señal con ruido gaussiano añadido, en el panel inferior izquierdo el tomograma y en la parte inferior derecha el resultado de la proyección de los autovectores 189-197 en $\theta = 15\pi/40$.

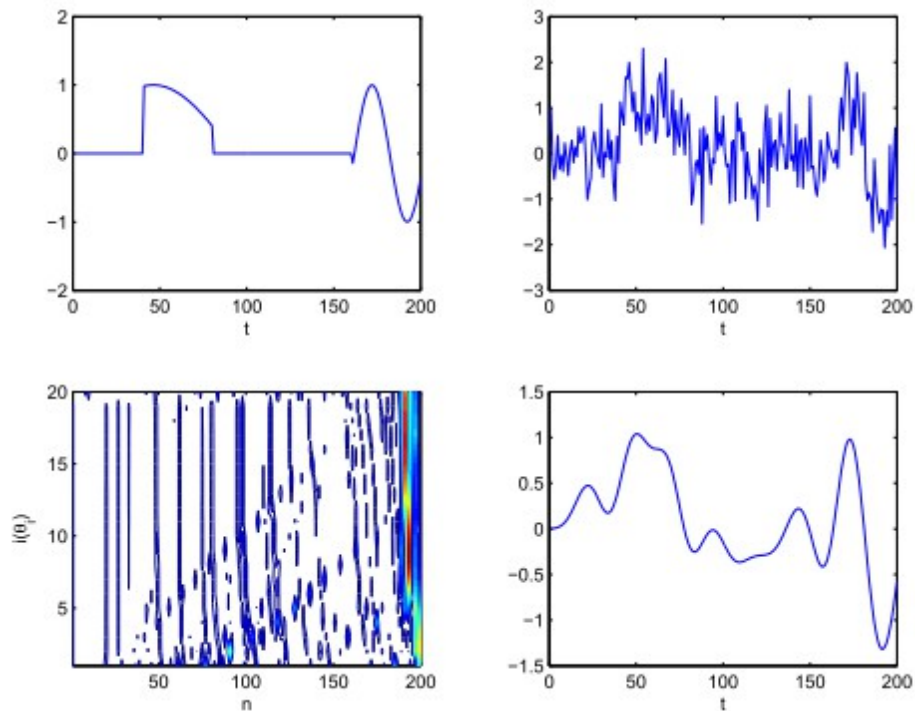


Figura 16: Análisis mediante tomografía para el ejemplo 2

Para el tercer ejemplo se van a utilizar datos reales obtenidos por la Phoenix Mars Lander. Se tratará de detectar un dust devil utilizando la técnica de la tomografía.

En el panel superior izquierdo de la figura 17 se representa un archivo de datos de presión de la Phoenix Mars Lander el cual contiene un intervalo de 2000 segundos con una frecuencia de muestreo de 0,5 Hz. El efecto del dust devil es claramente visible sobre a los 800s como un claro descenso en el valor de la presión.

Ha habido varios esfuerzos para la detección de dust devils en la atmósfera marciana basados principalmente en la comprobación de una serie de condiciones específicas en los datos medidos o por medio de FPGAs. Para la detección de dust devils se ha generado un conjunto de 278 señales que se asemejan a la forma que éstos producen en datos reales, esto es, una disminución repentina de la presión, de aproximadamente un 3% a partir de la línea de base, y con diferentes extensiones de tiempo que van de 60 a 80 unidades de tiempo.

En la parte superior derecha se presentan varias de estas señales típicas. Algunos de los las señales se han desplazado hacia arriba o abajo para una mayor claridad. Como en los

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

ejemplos anteriores un tomograma se construye para 20 diferentes valores de θ a intervalos $\Delta\theta = \pi/40$. En el panel inferior izquierdo de la Figura 6 se muestra una gráfica de contorno de los primeros 999 coeficientes del tomograma. El coeficiente $n = 1000$ corresponde al mayor autovalor y su correspondiente autovector. Este autovector contiene la mayor parte de la energía de la señal, y es varios órdenes de magnitud más grande que cualquier otro coeficiente, así que de nuevo para los propósitos de la representación el valor del coeficiente no se ha trazado en la tomografía.

Una vez más, a simple vista se observa que, a parte del coeficiente $n = 1,000$, el componente más fuerte se concentra cerca del valor $N = 400$. En la parte inferior derecha de la figura 17 se muestra la proyección en los autovectores 340 a 450 y 1000 a $\theta = 19\pi/40$. Se ve que la caída de presión producida por el dust devil está muy bien reconstruida y se separa de cualquier otro componente presente en la señal como el ruido o variaciones de presión mas pequeñas.

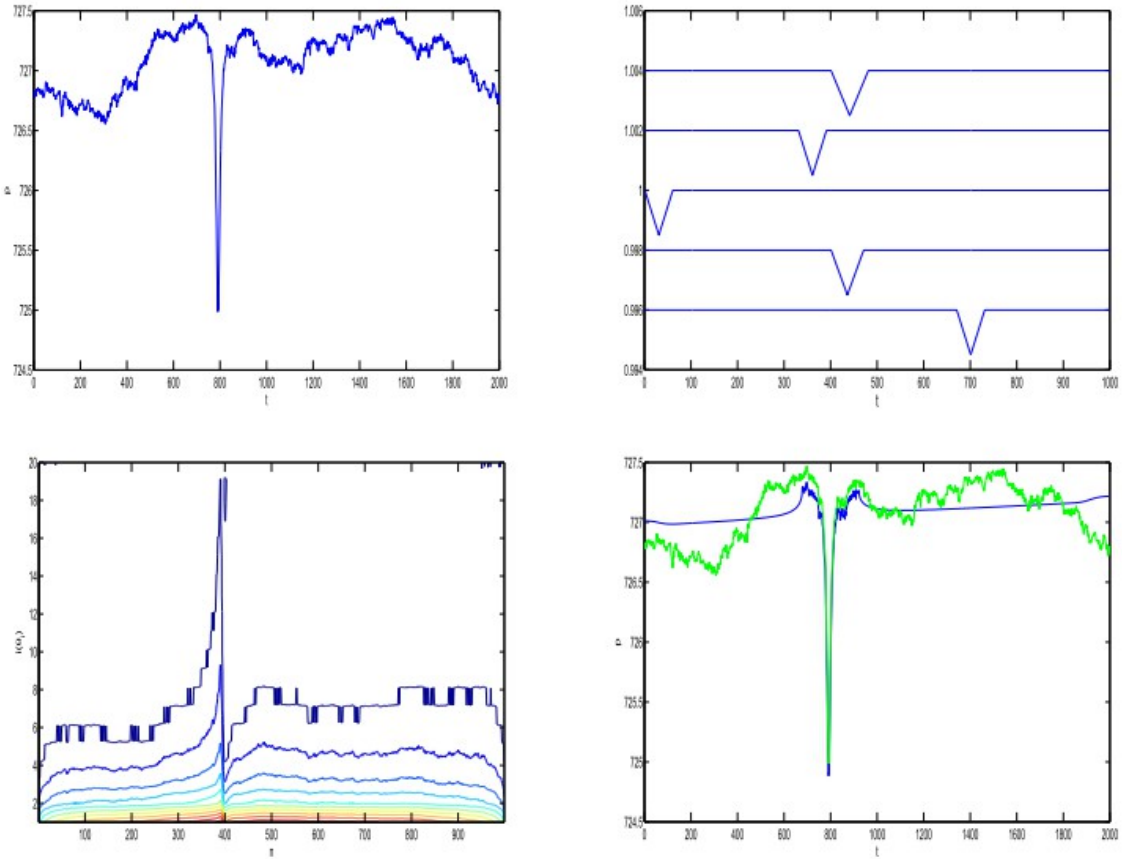


Figura 17: Análisis mediante tomografía para el ejemplo 3

7. Pruebas y resultados

En esta sección se probarán los algoritmos descritos para la detección de dust devils. Se elaborará un plan de pruebas destinado a lograr el mejor ajuste posible del algoritmo, tratando de descartar configuraciones que puedan producir tanto falsos positivos como falsos negativos.

Por otro lado se compararán y analizarán los resultados obtenidos mediante la técnica de la tomografía y el algoritmo STA/LTA, tratando de observar el comportamiento de cada uno de ellos para los mismos casos de detección.

7.1. Algoritmo STA/LTA

Se observa en las medidas recogidas en los ficheros y en gráficas, que la duración aproximada de las caídas de presión presuntamente provocadas por dust devils tienen una duración media de unos 20 a 30 segundos aproximadamente desde su inicio hasta su final. También es importante fijarse de los pequeños picos que presenta la gráfica, resultantes de pequeñas oscilaciones en la presión. Teniendo en cuenta estos factores se ha considerado como un tamaño de muestra apropiado para calcular la media a corto plazo(STA), de 4 muestras.

A continuación se procederá a realizar pruebas con diferentes relaciones en el tamaño entre el número de muestras para calcular las medias a largo y corto plazo, y su impacto en la detección de posibles dust devils. De igual forma, se realizarán pruebas con diferentes valores umbrales para la detección de estos fenómenos.

Para automatizar las pruebas ha usado el siguiente script que analizará todos los soles con los parámetros fijados:

```
#!/bin/bash
NUM=0
while [ $NUM -le 83 ]; do
    ./mars $NUM.dat 0.998 4 24
    let NUM=$NUM+1
done
```

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de detecciones obtenidas en los 84 soles para distintas relaciones del número de muestras para la media a corto plazo(Nsta) y a largo plazo(Nlta). Se decidió fijar Nsta a 4 como valor óptimo, por lo que se han realizado pruebas variando Nlta.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Nlta	Detecciones
8	4
16	11
24	17
32	20
40	28
70	72
100	119
500	247

Tabla 3: Detecciones para distintos valores de Nlta

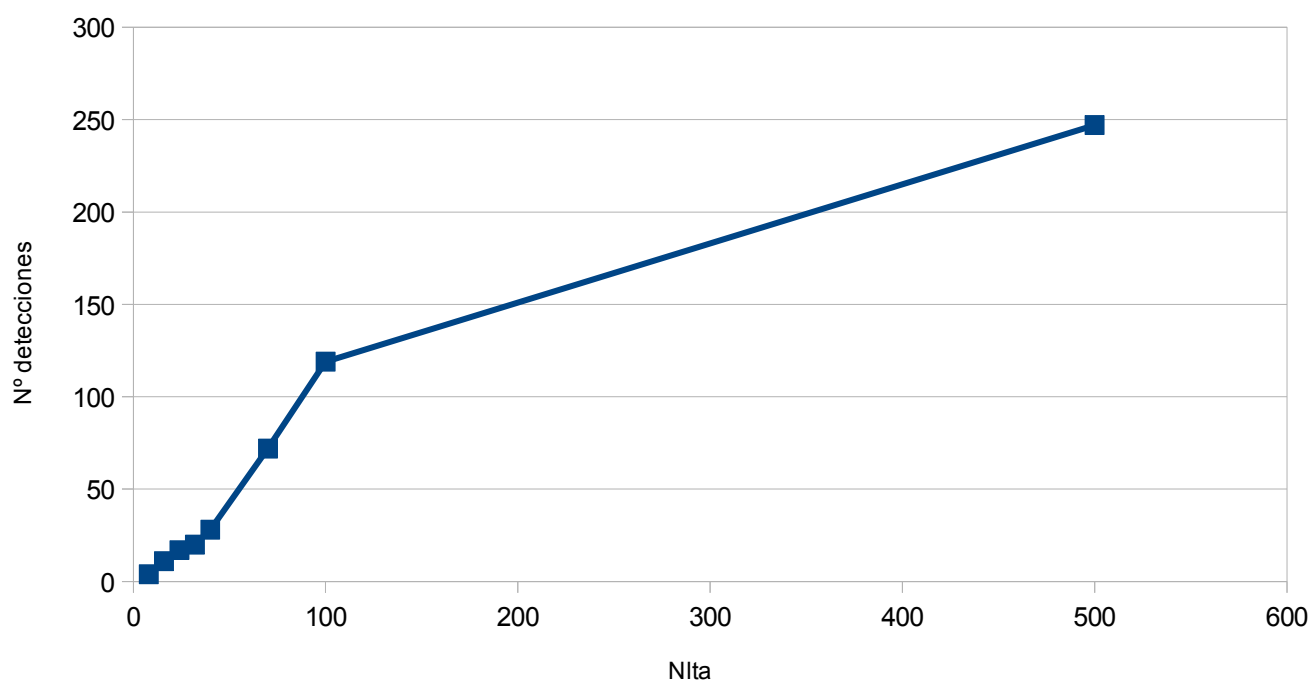


Figura 18: Gráfica del número de dust devils detectados en función de Nlta

A partir de esta tabla se han estudiado varios casos concretos de detección para distintas relaciones con el fin de descartar aquellas que producen falsos positivos o falsos negativos.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Por ejemplo, entre Nlta 8 y 16 se observo como en el caso de 8 no detectaba varios dust devils que si eran detectados con 16, como por ejemplo en la siguiente imagen de una sección del sol 68 con dos posibles dust devils que el algoritmo con Nlta=8 no detecto. El eje X representa el número de muestra en esa sesión y el eje Y el valor de la presión en milibares:

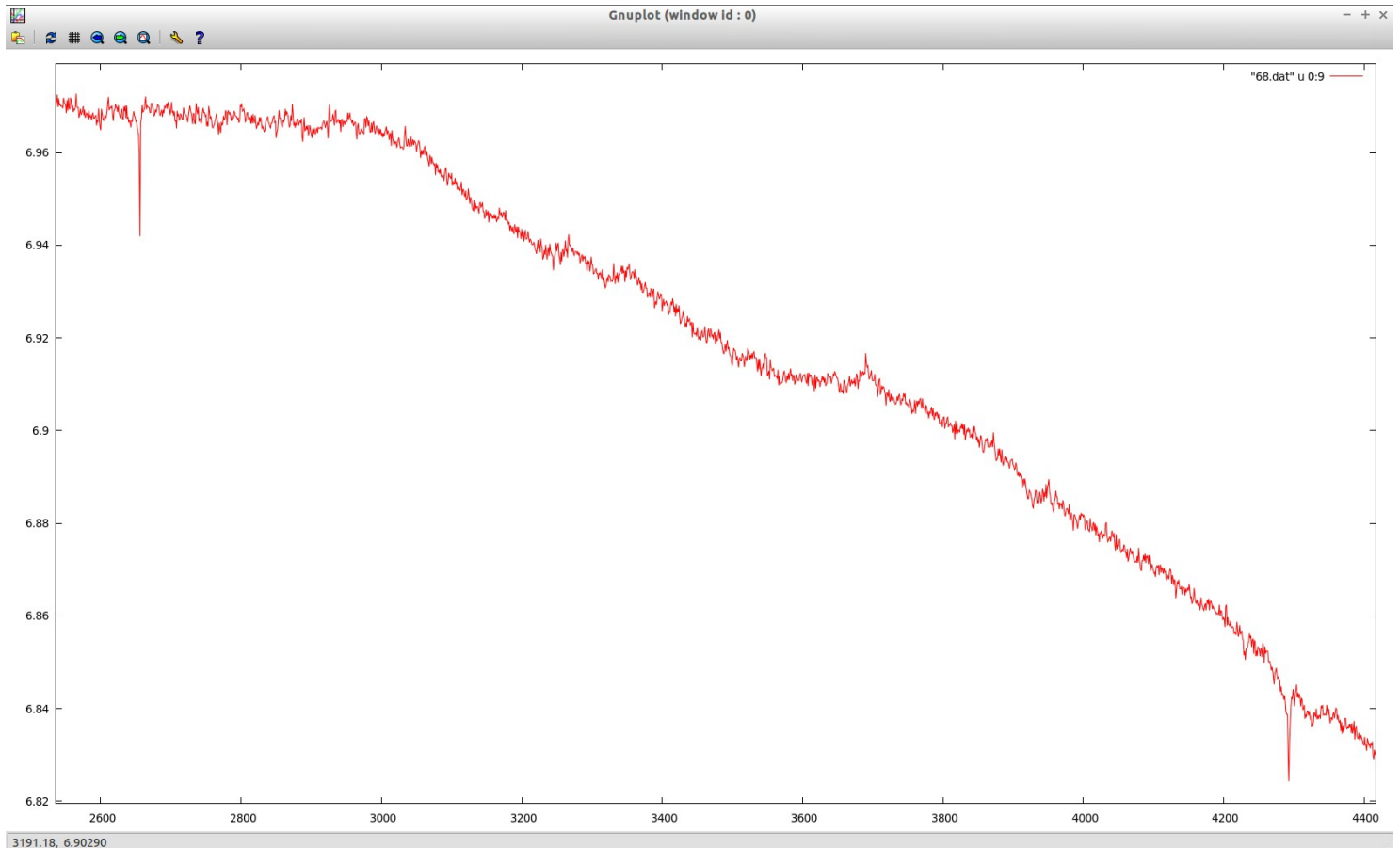


Figura 19: Dust devils en el sol 68

De igual modo sucedió entre los valores de Nlta 16 y 24, como muestra de ejemplo el siguiente dust devil no detectado con la primera configuración y sí con la segunda en el sol 36:

Detección de tornados en la atmósfera de Marte



Figura 20: Dust devil en el sol 36

En el caso de $Nlta=32$ se detectaron solamente 3 más que con 24, pero tras un análisis de los mismo resultaron ser falsos positivos. De igual modo para valores superiores. En la siguiente imagen se observa el falso positivo que se obtuvo en el sol 72

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

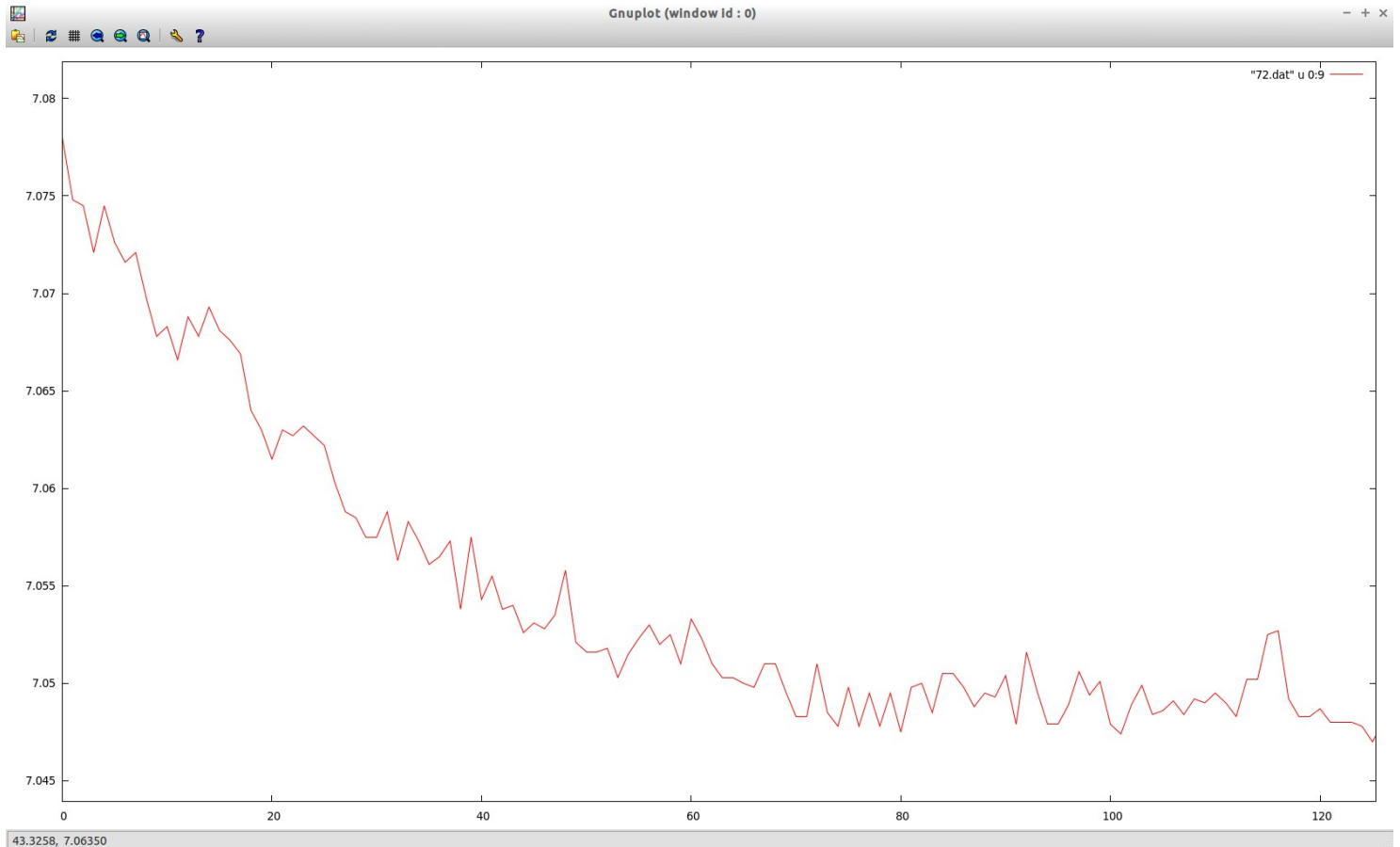


Figura 21: Región del sol 72 donde se detecto un falso positivo

A partir de este estudio, se observó que para valores mayores de $Nlta$ (número de muestras para calcular la media a largo plazo) le era cada vez más complicado a este indicador adaptarse a situaciones donde la presión caía de forma pronunciada pero de forma mantenida en el tiempo, de forma que esto causaba un aumento en falsos positivos. Después de analizar estos datos se ha decidido como la mejor relación para unas detecciones fiables aquella con $Nsta=4$ y $Nlta=24$.

De forma similar a la anterior tabla, en la siguiente, se muestra la cantidad de detecciones obtenidas en los 84 soles para distintos valores del umbral de detección.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Umbral	Detecciones
0,996	5
0,997	7
0,998	17
0,9982	22
0,9985	60
0,999	333

Tabla 4: Detecciones para distintos umbrales

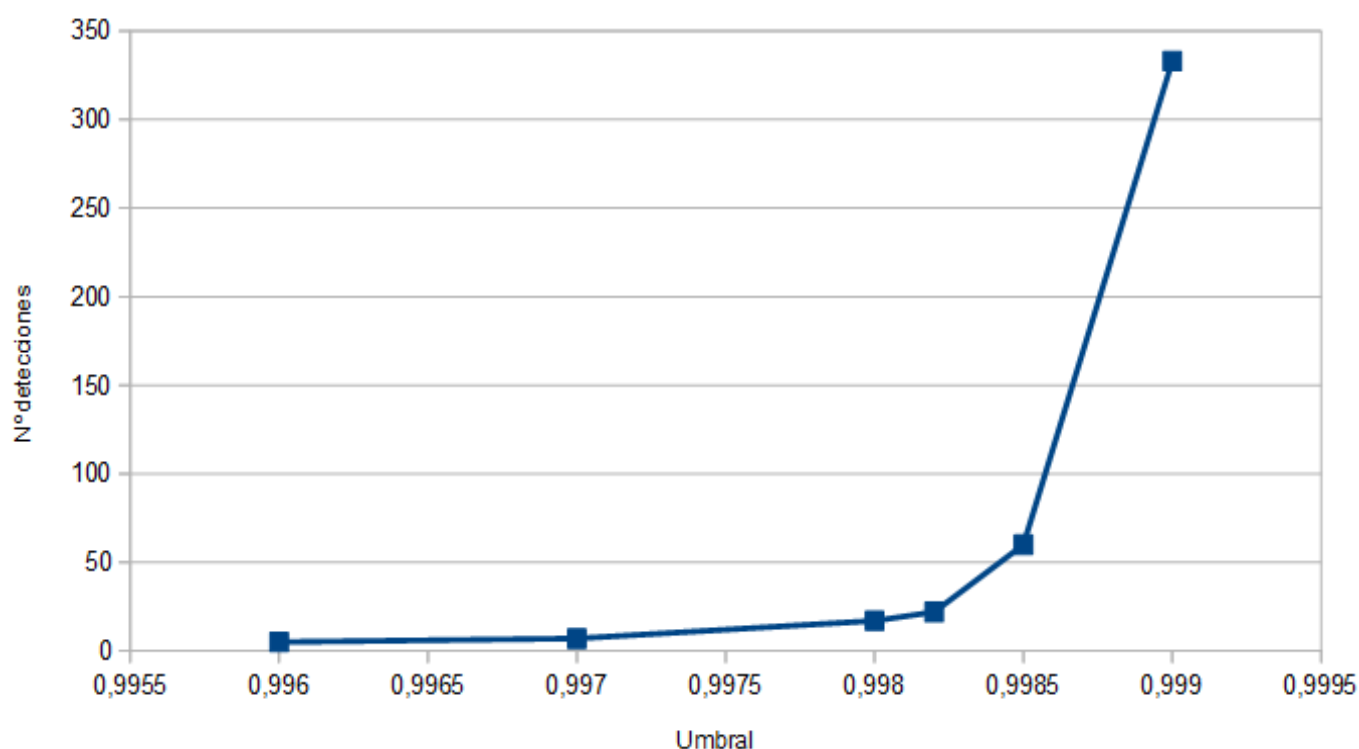


Figura 22: Gráfica del número de detecciones en función del umbral

A partir de la anterior tabla se han estudiado varios casos concretos de detección para esos umbrales con el fin de descartar aquellos que producen falsos positivos o falsos negativos. Se observa como a partir de umbrales mayores que 0,998 el número de detecciones se dispara de forma exponencial, por lo que se debe centrar la atención en ese rango.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

Se observó como con valores menores a 0.998 muchos posibles candidatos a dust devils eran ignorados. Por otro lado con simplemente aumentar a 0.9982 ya empezaron a detectarse falsos positivos como puede observarse en le siguiente imagen del sol 27 donde con este valor dio un positivo:

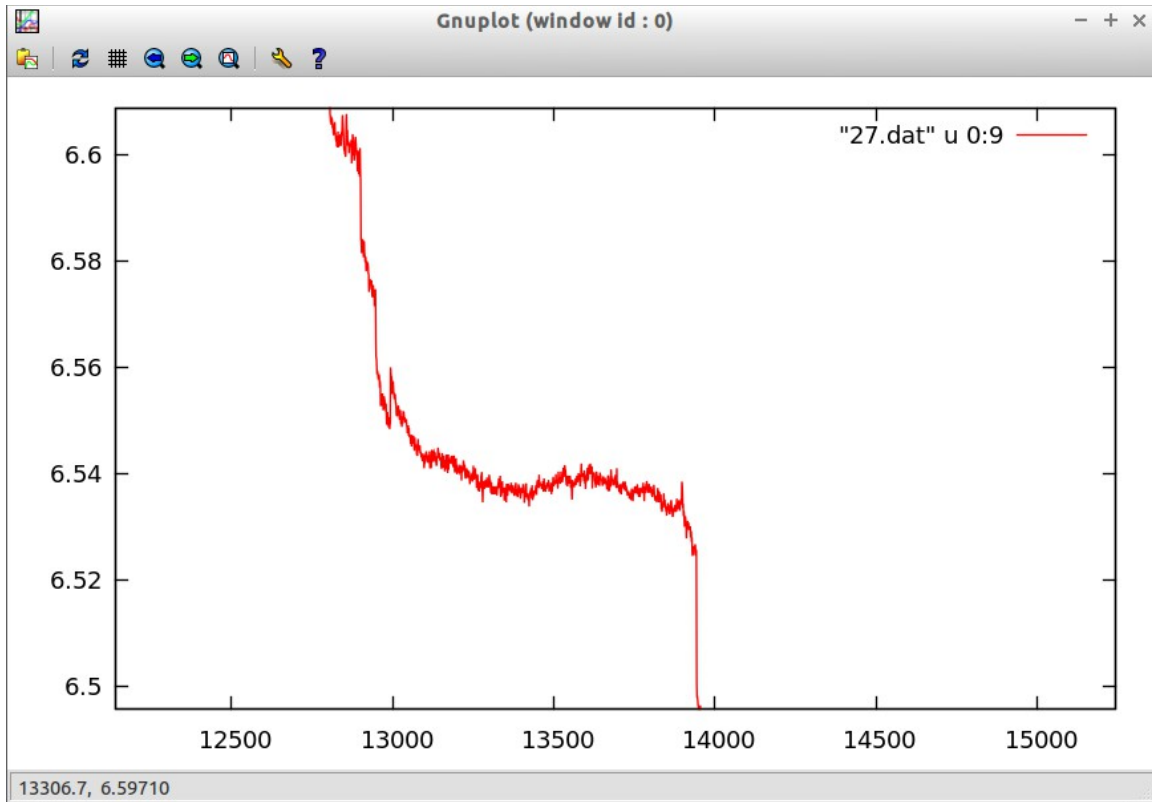
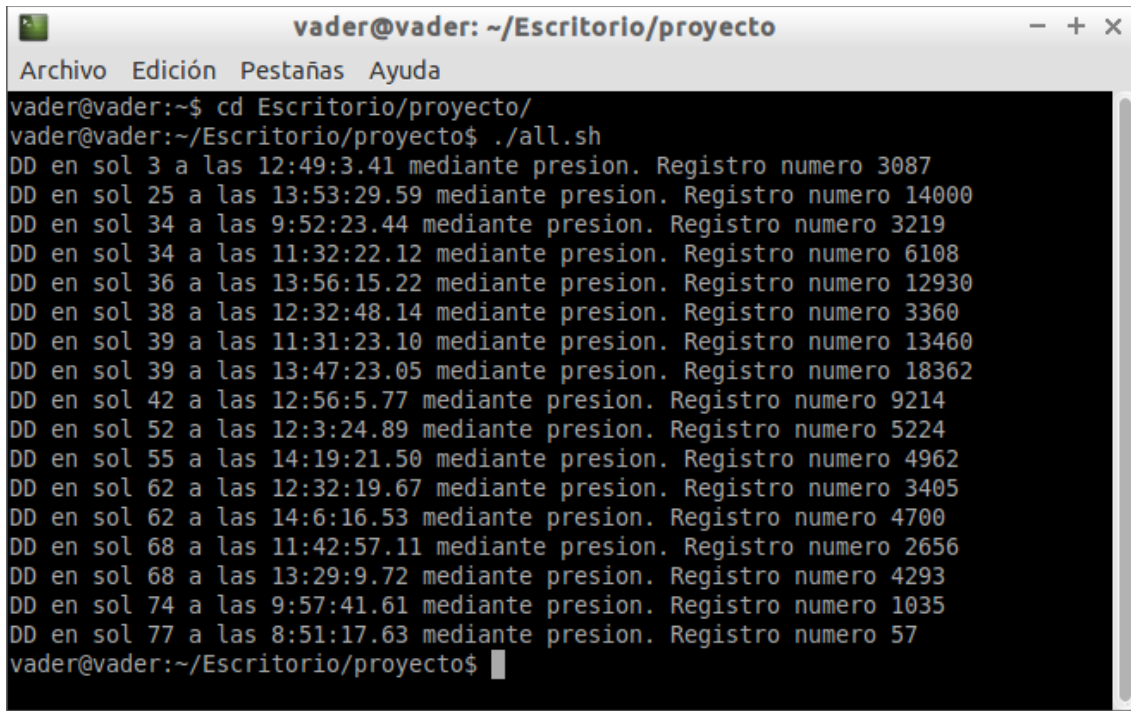


Figura 23: Región del sol 27 donde se detecto un falso positivo

Una vez analizado y estudiado el comportamiento para los distintos umbrales se ha decidido fijar como umbral detección óptimo el valor 0.998, ya que para valores poco mayores que éste, la sensibilidad a los cambios de presión aumenta de forma exponencial.

En la figura 24 se muestra la salida del algoritmo con los valores Nsta, Nlta y umbral fijados como óptimos anteriormente, para la detección de dust devils en las muestras recogidas por la sonda Pathfinder.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte



```
vader@vader: ~/Escritorio/proyecto
Archivo Edición Pestañas Ayuda
vader@vader:~$ cd Escritorio/proyecto/
vader@vader:~/Escritorio/proyecto$ ./all.sh
DD en sol 3 a las 12:49:3.41 mediante presion. Registro numero 3087
DD en sol 25 a las 13:53:29.59 mediante presion. Registro numero 14000
DD en sol 34 a las 9:52:23.44 mediante presion. Registro numero 3219
DD en sol 34 a las 11:32:22.12 mediante presion. Registro numero 6108
DD en sol 36 a las 13:56:15.22 mediante presion. Registro numero 12930
DD en sol 38 a las 12:32:48.14 mediante presion. Registro numero 3360
DD en sol 39 a las 11:31:23.10 mediante presion. Registro numero 13460
DD en sol 39 a las 13:47:23.05 mediante presion. Registro numero 18362
DD en sol 42 a las 12:56:5.77 mediante presion. Registro numero 9214
DD en sol 52 a las 12:3:24.89 mediante presion. Registro numero 5224
DD en sol 55 a las 14:19:21.50 mediante presion. Registro numero 4962
DD en sol 62 a las 12:32:19.67 mediante presion. Registro numero 3405
DD en sol 62 a las 14:6:16.53 mediante presion. Registro numero 4700
DD en sol 68 a las 11:42:57.11 mediante presion. Registro numero 2656
DD en sol 68 a las 13:29:9.72 mediante presion. Registro numero 4293
DD en sol 74 a las 9:57:41.61 mediante presion. Registro numero 1035
DD en sol 77 a las 8:51:17.63 mediante presion. Registro numero 57
vader@vader:~/Escritorio/proyecto$
```

Figura 24: Dust devils detectados con los valores óptimos

7.2. Tomografía

A continuación se realizarán varias pruebas mediante tomografía y se compararán con los resultados obtenidos con el anterior algoritmo. Para esto centraremos las pruebas mayormente en los dust devils ya detectados para ver como se comporta. También se probarán muestras donde no hay presencia de estos fenómenos, o algunos casos sensibles a generar falsos positivos. El programa en matlab “tomog.m” puede verse en el anexo A.

Con estas pruebas se pretende determinar el comportamiento de ambos algoritmos en diferentes contextos a fin de poder establecer los puntos fuertes y débiles de cada uno, y sus comportamientos.

En la figura xx se muestra el tomograma típico de una región sin dust devils y con una presión estable. Puede verse que no existe acumulación de energía en ninguna región del tomograma.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

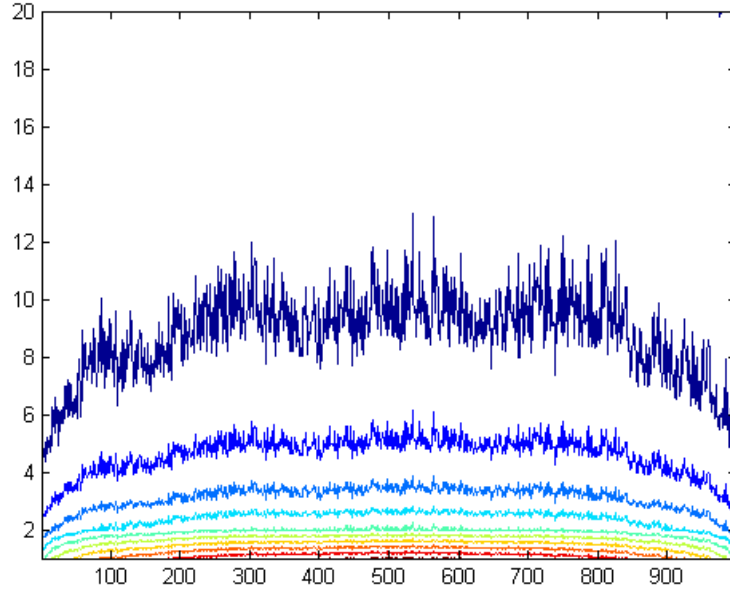


Figura 25: Tomograma sin detección

En la siguiente imagen se muestra a la izquierda el tomograma para el sol 3 en el mismo periodo de tiempo que se detectó el dust devil con el anterior algoritmo. A la derecha en azul tenemos el segmento original y en rojo la versión filtrada con el dust devil reconstruido. Puede observarse en el tomograma que la energía se acumula en los puntos donde hay un dust devil. Se ve como la reconstrucción no es perfecta para $\theta = 19\pi/40$.

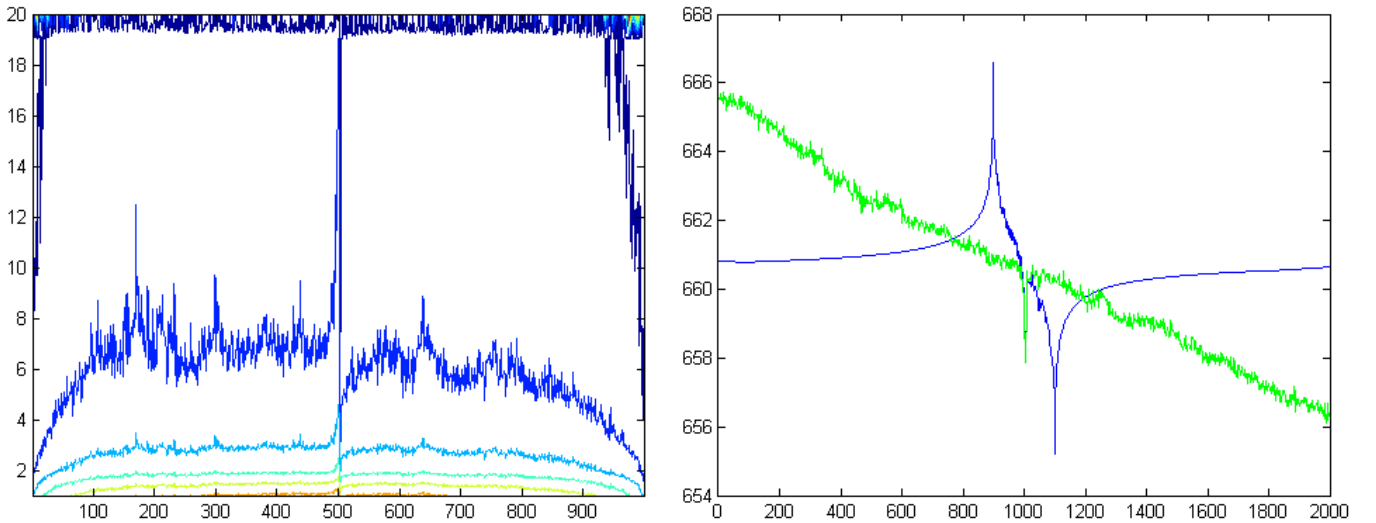


Figura 26: Tomograma para el sol 3

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

En las siguientes imágenes puede verse el análisis para el sol 34. En este caso mediante tomografía se detecto un dust devil más que con el algoritmo STA/LTA, en concreto el más débil de ellos. Por el resultado parece ser que mediante tomogramas se detectan mejor los dust devils más débiles. En este caso al contrario que en el anterior, la reconstrucción para $\theta = 19\pi/40$ es bastante buena. Ésto nos lleva a fijarnos en las diferencias existentes entre ambos análisis, viendo que en el primer caso la presión presentaba una tendencia descendente, mientras que en éste ultimo la presión se mantenía estable en el tiempo.

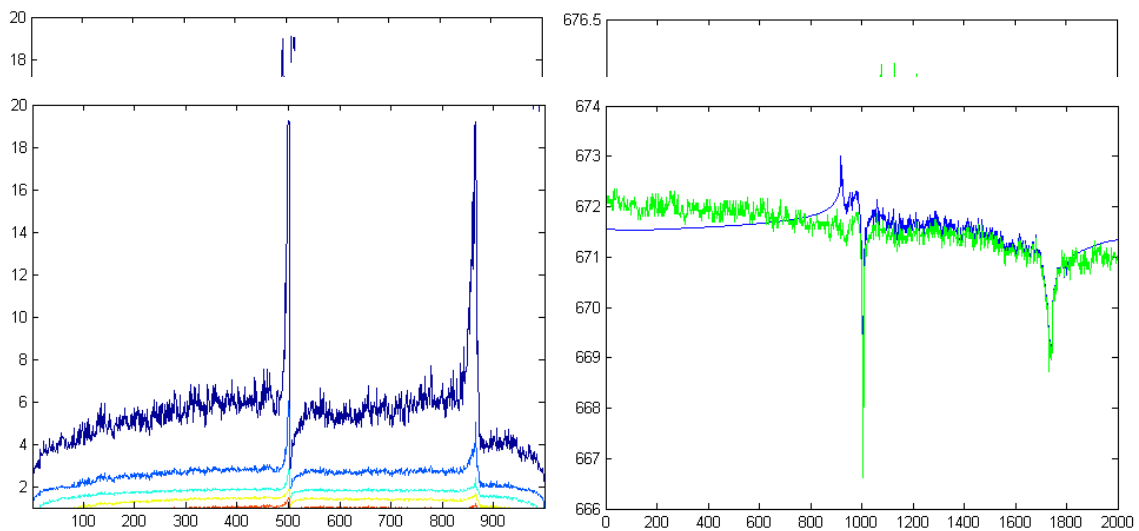


Figura 27: Tomogramas con detecciones para el sol 34

En el análisis del sol 33 se ve una acumulación de energía al principio del análisis y un intento de reconstrucción del dust devil, pero como puede verse en la figura 28 se trataría de un falso positivo.

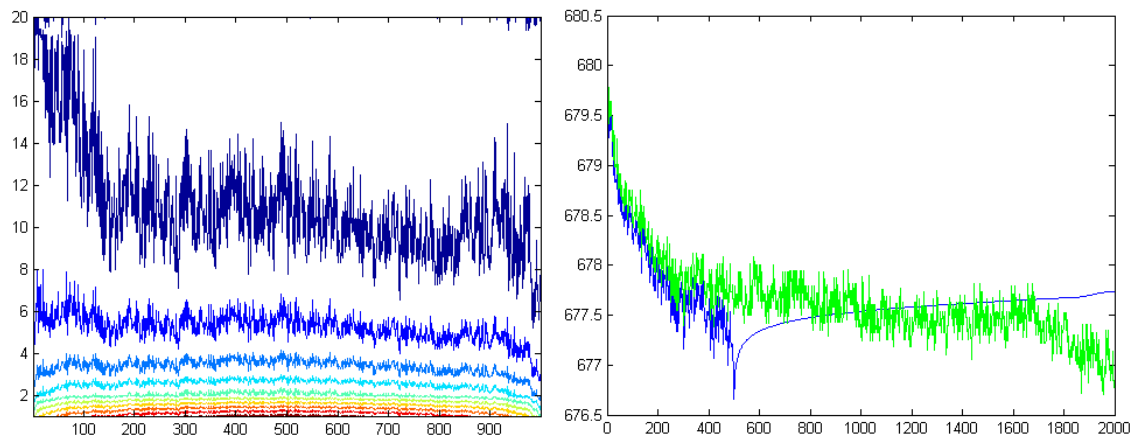


Figura 28: Tomograma con falso positivo para el sol 33

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

De nuevo, parece que el comportamiento en caso de que la presión no tenga una tendencia a mantenerse estable en el tiempo es impreciso y poco fiable. Se dieron resultados bastante parecidos en todos los casos de cambios bruscos, aunque prolongados en el tiempo, en los valores de presión. Esto lleva a intuir que esta técnica tiene su funcionamiento óptimo para unas condiciones atmosféricas bastante estables, perdiendo fiabilidad en caso contrario.

8. Conclusiones

El algoritmo STA/LTA ha demostrado que bien establecidos sus parámetros de detección y análisis de la señal, es una herramienta muy eficaz a la hora de detectar eventos sobre series temporales. A partir de las pruebas llevadas a cabo, en concreto con los ajustes finales, se logró que detectara un buen número de dust devils, y tras la inspección en las gráficas ninguno de ellos resultó ser un falso positivo. Como contrapartida, al menos con los ajustes finales utilizados, si que parece que podía estar no detectando algunos de los dust devils mas débiles.

La técnica de la tomografía ha presentado un buen rendimiento en la detección de dust devils, en particular de aquellos mas débiles que podían asemejarse al ruido de la señal. Por lo tanto es un buen método de detección en señales con presencia de ruido, ya que es bastante capaz de distinguir éste de los eventos. Tiene su punto débil en la detección de eventos en señales no horizontales, es decir, aquellas que tienden a la alza o a la baja de forma pronunciada la media de los datos que se están analizando. Ésto es un gran problema en un sistema tan cambiante como es la atmósfera.

Los algoritmos basados en la frecuencia son, por lo general, más costosos computacionalmente que los algoritmos que trabajan en el dominio del tiempo, y sus requisitos de procesamiento son mayores. Estos requisitos de procesamiento se pueden reducir tomando momentos temporales mas espaciados, pero como contrapartida también estarán perdiendo resolución en la salida y serán menos precisos. Concretamente en los algoritmos estudiados, el tiempo que se tardaba en generar el tomograma para una muestra de solo 1000 datos de presión, era prácticamente el mismo que tardaba el algoritmo STA/LTA en analizar los 84 soles totales.

Si se deseara incluir algunos de estos algoritmos en alguna sonda espacial, la opción más lógica teniendo en cuenta las limitaciones de éstas, sería el algoritmo STA/LTA. Este algoritmo puede operar prácticamente en tiempo real y sus requisitos de memoria son en general bajos, aunque estarán directamente relacionados con la frecuencia de muestreo, ya que ésta influirá directamente en el tamaño de la media a corto y largo plazo.

Como trabajo futuro sería interesante desarrollar y hacer uso de técnicas de neurocomputación como son las redes neuronales para la detección de patrones. Es posible que con la configuración y el entrenamiento adecuado de perceptrón multicapa se lograra mejorar los resultados obtenidos con ambos algoritmos.

Referencias

- [1] - Mitchell Withers*, Richard Aster, Christopher Young, Judy Beiriger, Mark Harris, Susan Moore, Julian Trujillo. (1998). A Comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection.
- [2] - Transformada integral. (2014, 24 de mayo). Wikipedia, La enciclopedia libre. http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Transformada_integral&oldid=74606856
- [3] - Aplicación lineal. (2014, 28 de junio). Wikipedia, La enciclopedia libre. http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aplicaci%C3%B3n_lineal&oldid=75283031.
- [4] - Korn, G. A.; Korn, T. M. (1967), Mathematical Handbook for Scientists and Engineers (2nd ed.), McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-035370-0.
- [5] - Rowland, Todd. "Bilinear Form." From MathWorld--A Wolfram Web Resource, created by Eric W. Weisstein.
- [6] - Luis Vázquez Martínez. (2008). La gran aventura de la exploración de Marte.
- [7] - Mars Pathfinder. (2014, 9 de mayo). Wikipedia, La enciclopedia libre. http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars_Pathfinder&oldid=74292588.
- [8] - Carlos Aguirre, R. Vilela Mendes. (2012). Signal recognition and adapted filtering by non-commutative tomography.
- [9] - J. T. Schofield, J. R. Barnes, D. Crisp, R. M. Haberle, S. Larsen, J. A. Magalhães, J. R. Murphy, A. Seiff and G. Wilson. (December 1997). The Mars Pathfinder Atmospheric Structure Investigation/Meteorology (ASI/MET) Experiment
- [11] - Andres Castano, Alex Fukunaga, Jeffrey Biesiadecki, Lynn Neakrase, Patrick Whelley, Ronald Greeley, Mark Lemmon, Rebecca Castano and Steve Chien. (2006). Autonomous detection of dust devils and clouds on Mars.
- [12] - M. D. Ellehoj et al. (Abril 2009). Convective vortices and dust devils at the Phoenix Mars mission landing site.
- [13] - Matt Balme, Ronald Greeley. (2006). Dust devils on Earth and Mars.
- [14] – Ferri et al. (2000). Dust devils as observed by Mars Pathfinder.
- [15] - R. D. Lorenz. (2012). Observing desert dust devils with a pressure logger.

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

[16] - R. D. Lorenz. (2013). Dust devil populations : comparing in-situ measurements with imaging and tracks.

[17] - Andres Castano et al. (2006). Automatic detection of dust devils and clouds on Mars.

[18] - Ringrose, Tim; Zarnecki, John; Towner, Martin; Kapartis, S. and Strachan, R. (2001). Martian Dust Devil Detection with the Beagle 2 Wind Sensor. In: 32nd Lunar and Planetary Science Conference, 12-16 March 2001, Houston, Texas, USA.

[19] – Renno et al. (1998). Martian and terrestrial dust devils: Test of a scaling theory using Pathfinder data.

Anexo A

Tomog.m:

```
% Filtering by tomography
%
figure(1);
rand('seed',sum(100*clock));
eps=0.4;
tol=500000000;
dt=1;
n=1000;
k=278;
nf=0.1;
ntet=20;
VR=zeros(n,n,ntet);

% fichero con los patrones de DD
M=load('U.txt'); %matriz U

%generacion operador lineal S
[V,D1]=eig(M'*M); % A
OP=zeros(n,n);
for id=n-k+1:n
    OP=OP+D1(id,id)*V(:,id)*V(:,id)';
end

T=dt*diag(1:n);
for id=1:ntet
    id
    tet=pi*(id)/(2*(ntet));
    W=cos(tet)*T+sin(tet)*OP;
    [V,D]=eig(W'*W);
    VR(:, :, id)=V;
end

%generacion de los coeficientes.
coef=zeros(ntet,n);
for id=1:ntet
    coef(id,:)=stest*VR(:, :, id);
    coef2=abs(coef).^2;
end

coeftr=coef;
contour(1:999,1:ntet,abs(coeftr(1:ntet,1:999)))

pause

%decidir region donde cortar y reconstruir
cut_from=input('cut from?')
cut_to=input('cut to?')
for id=1:ntet
    pl=VR(:,cut_from:cut_to,id)*coeftr(id,cut_from:cut_to)'+ VR(:,1000,id)*coeftr(id,1000)';
    id
    plot(1:2:2000,pl)
    hold
    plot(1:2:2000,snoi,'g')
    hold off
    pause
end

hold
hold off

% fichero a analizar
stes=load('sol136-1.txt');
stest=stes';
snoi=test;
```

extract.c:

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/dir.h>
#include <sys/param.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <strings.h>

#include "mars.h"

#define FALSE 0
#define TRUE !FALSE

extern int alphasort();

char pathname[MAXPATHLEN];
char outname[MAXPATHLEN];
int col;
double value;

int list_dir(void);
int file_select(const struct direct *entry);

int main(int argc, char *argv[])
{
    if(argc < 4) {
        printf("Usage extract <file_salida> <col_number> <value>\n");
        return 0;
    }

    getwd(pathname);
    strcpy(outname, pathname);
    strcat(outname, "/");
    strcat(outname, argv[1]);

    col = atoi(argv[2]);
    value = atof(argv[3]);

    list_dir();
    printf("\n"); /* flush buffer */

    return 0;
}

int list_dir(void)
{
    int count, i, j;
    const struct direct **files;
    FILE *fp_in;
    FILE *fp_out;
    char line[MAX_LINE];
    MARS_HEADER header;
    double *pdata;
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
int ret;
getwd(pathname);
count = scandir(pathname,(struct dirent *** __restrict__)&files, file_select, alphasort);

for (i=1;i<count+1;++i) {
    if(files[i-1]->d_type == 4) {
        chdir(files[i-1]->d_name);
        list_dir();
        chdir("../");
    } else {
        //printf("%s\n",files[i-1]->d_name);
        fp_in=fopen(files[i-1]->d_name,"r");
        fp_out=fopen(outname,"a");

        if(fgets(line,MAX_LINE,fp_in)==NULL)
            return 3;

        ret=sscanf(line,"%d %d %lf %lf %lf %lf %d %lf %lf %lf %lf\n",
            &(header.session_number),
            &(header.received_data_records),
            &(header.session_duration),
            &(header.science_averaging_interval),
            &(header.housekeeping_averaging_interval),
            &(header.sampling_interval),
            &(header.wind_sensor_double_type),
            &(header.wind_sensor_low_power_duration),
            &(header.wind_sensor_high_power_duration),
            &(header.spacecraft_clock_start_count),
            &(header.solar_longitude));

        if(ret != LENGTH_HEADER) {
            printf("Wrong or incomplete header\n");
            return 4;
        }

        //printf("Sampling interval %lf\n",header.sampling_interval);

        pdata=(double *)malloc(LENGTH_DATA_RECORD*sizeof(double));

        for(j=0;j<header.received_data_records;j++) {
            if(fgets(line,MAX_LINE,fp_in)==NULL) {
                printf("Wrong mars data in %s, line %d\n",files[i-1]->d_name,j+1);
                return 5;
            }

            ret = sscanf(line,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf
            %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",
            &(pdata[0]),
            &(pdata[1]),
            &(pdata[2]),
            &(pdata[3]),
            &(pdata[4]),
            &(pdata[5]),
            &(pdata[6]),
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
&(pdata[7]),
&(pdata[8]),
&(pdata[9]),
&(pdata[10]),
&(pdata[11]),
&(pdata[12]),
&(pdata[13]),
&(pdata[14]),
&(pdata[15]),
&(pdata[16]),
&(pdata[17]));

if(ret != LENGTH_DATA_RECORD){
printf("Wrong or incomplete line, on line %d\n",j+1);
return 6;
}

if(pdata[col]==value){
    fprintf(fp_out,"%d %d %d %lf %lf %lf %lf %lf
%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %d\n",
(int)(pdata[0]),
(int)(pdata[1]),
(int)(pdata[2]),
(pdata[3]),
(pdata[4]),
(pdata[5]),
(pdata[6]),
(pdata[7]),
(pdata[8]),
(pdata[9]),
(pdata[10]),
(pdata[11]),
(pdata[12]),
(pdata[13]),
(pdata[14]),
(pdata[15]),
(pdata[16]),
(int)(pdata[17]));
}
}
free(pdata);
fclose(fp_in);
fclose(fp_out);
}
}
return 0;
}

int file_select(const struct direct *entry){
char *ptr;
if ((strcmp(entry->d_name, ".") == 0) || (strcmp(entry->d_name, "..") == 0))
return (FALSE);

if(entry->d_type == 8) {
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
ptr = rindex(entry->d_name, '.');
if ((ptr != NULL) && strcmp(ptr, ".tab") == 0 && entry->d_name[0]=='s' && entry->d_name[1]=='r')
    return (TRUE);
}
if(entry->d_type == 4)
    return (TRUE);
return (FALSE);
}
```

mars.c:

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include "lista.h"

#define LENGTH_HEADER 11
#define LENGTH_DATA_RECORD 18

#define MUESTRAS_CORTO_P 4
#define MUESTRAS_LARGO_P 32

#define MUESTRAS_CORTO_T 2
#define MUESTRAS_LARGO_T 5

typedef struct {
    int session_number;
    int received_data_records;
    double session_duration;
    double science_averaging_interval;
    double housekeeping_averaging_interval;
    double sampling_interval;
    int wind_sensor_double_type;
    double wind_sensor_low_power_duration;
    double wind_sensor_high_power_duration;
    double spacecraft_clock_start_count;
    double solar_longitude;
} MARS_HEADER;

typedef struct {
    float temperatura;
    float presion;
    //fecha
    //hora
} dato;

void genTomogData(char *fich,int sol,int pos,int n);

int main(int argc, char *argv[]){

    FILE *f=NULL;
    //MARS_HEADER header;
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
char cad[255];
LE listaPres=NULL;
//LE listaTemp=NULL;
float umbralPres;//0.998
int nlta,nsta;
float tiempoanterior=60;
float horaanterior=100;
//float umbralTemp=1;
double data[LENGTH_DATA_RECORD];
int jp=0;
int hora=-1,min=-1;
int contador=0;
int detectados=0;

//cargar datos en memoria
f=fopen(argv[1],"r");
umbralPres=atof(argv[2]);
nsta=atoi(argv[3]);
nlta=atoi(argv[4]);

//Lectura de cabecera
/*if(fgets(cad,255,f)!=NULL){
ret=sscanf(cad,"%d %d %lf %lf %lf %lf %d %lf %lf %lf %lf %lf", &(header.session_number),
&(header.received_data_records),
&(header.session_duration),
&(header.science_averaging_interval),
&(header.housekeeping_averaging_interval),
&(header.sampling_interval),
&(header.wind_sensor_double_type),
&(header.wind_sensor_low_power_duration),
&(header.wind_sensor_high_power_duration),
&(header.spacecraft_clock_start_count),
&(header.solar_longitude));

if(ret != LENGTH_HEADER) {
printf("Wrong or incomplete header\n");
return -1;
}

printf("Registros: %d\n",header.received_data_records);
}*/

int np=nlta-nsta+1;
//int nt=MUESTRAS_LARGO_T-MUESTRAS_CORTO_T+1;

while(fgets(cad,255,f)!=NULL){

sscanf(cad,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf",
&data[0],&data[1],&data[2],&data[3],&data[4],
&data[5],&data[6],&data[7],&data[8],&data[9]);

//Si hay un salto temporal grande la comparacion no es valida y hay que reiniciarla
if(((data[2]>tiempoanterior+4)||((horaanterior<data[1] && tiempoanterior<59) && data[2]>=0)||
(horaanterior<data[1]-1))){
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
liberaTabla(listaPres);
listaPres=NULL;
jp=0;
}
    tiempoanterior=data[2];
    horaanterior=data[1];

    //Presiones
insert(&listaPres,data[9]*data[9]);
//insert(&auxP,data[9]);

//Temperaturas
/*insert(&listaTemp,data[4]);
jt++;*/

if(jp>=nlta){
borraPrimero(&listaPres);
}

//Detectar con presion
if(jp>=nlta && ((suman(listaPres,np)/nsta)/(suma(listaPres)/nlta)) < umbralPres){
if(hora!=(int)data[1] || min>=(int)data[2]+3 || (min>=55 && (int)data[2]>0 && (int)data[2]<56)){
hora=(int)data[1];
min=(int)data[2];
printf("DD en sol %d a las %d:%d:%.2lf mediante presion. Registro numero %d\n",(int)data[0],(int)data[1],
(int)data[2],data[3],contador);
detectados++;
genTomogData(argv[1],(int)data[0],contador,detectados);
}
}
contador++;
//Detectar con temperatura
//if(data[1]==13){
//printf("%d:%d:%.2lf -- %lf\n",(int)data[1],(int)data[2],data[3],((suma(cortoTemp)/MUESTRAS_CORTO_T)/
(suma(largoTemp)/MUESTRAS_LARGO_T)));
//}
//if(jt>=MUESTRAS_LARGO_T && ((suman(listaTemp,nt)/MUESTRAS_CORTO_T)/
(suma(listaTemp)/MUESTRAS_LARGO_T)) > 1.27){
//printf("DD en sol %d a las %d:%d:%.2lf mediante temperatura.\n",(int)data[0],(int)data[1],(int)data[2],data[3]);
//}
jp++;
}

fclose(f);
liberaTabla(listaPres);
//liberaTabla(listaTemp);
return 0;
}

void genTomogData(char *fich,int sol,int pos,int n){
FILE *in;
```


Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
FILE *out;
char cad[255];
char fich2[255];
int i=0,j=0;
int posicion;
double data[18];

in = fopen (fich, "r");
sprintf(fich2, "sol%d-%d.txt",sol,n);
out = fopen (fich2, "w");
posicion = pos;

while(fgets(cad,255,in)!=NULL){
    if(i>=posicion-500 && i<posicion+500 && j<1000){
        sscanf(cad,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf",
            &data[0],&data[1],&data[2],&data[3],&data[4],
            &data[5],&data[6],&data[7],&data[8],&data[9]);
        fprintf(out,"%lf\n\n",data[9]*100);
        j++;
    }
    i++;
}
fclose (in);
fclose (out);
return;
}
```

lista.c:

```
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include "lista.h"

/*Funcion para insertar un elemento en la lista*/
void insert(LE *le, double data){

    nodo *aux=*le;
    nodo *n=(nodo*)malloc(sizeof(nodo));
    n->data=data;
    n->next=NULL;

    if(aux==NULL){
        *le=n;
        return;
    }
    else{
        while(aux->next!=NULL){
            aux=aux->next;
        }
    }
}
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
    aux->next=n;
    return;
}

void borraPrimero(LE *le){
    if (*le != NULL) {
        nodo *n = *le;
        *le = (*le)->next;
        free(n);
    }
}

/*Funcion para liberar la tabla hash*/
void liberaTabla(LE le){
    nodo *aux=NULL,*q=NULL;
    aux=le;
    while(aux!=NULL){
        q=aux->next;
        free(aux);
        aux=q;
    }
}

double suman(LE le, int n){
    double sum=0;
    int i=1;

    while(le!=NULL){
        if(i>=n)
            sum+=le->data;
        le=le->next;
        i++;
    }
    return sum;
}

double suma(LE le){
    double sum=0;
    while(le!=NULL){
        sum+=le->data;
        le=le->next;
    }
    return sum;
}

void imprimelista(LE l){
    while(l!=NULL){
        printf("%lf\n",l->data);
        l=l->next;
    }
}

int normalize_data(double** pdata,int field, int num_records){
    double avg=0;
```

Detección de tornados en la atmósfera de Marte

```
double var=0;
int j;

if(pdata==NULL)
    return 0;

for(j=0;j<num_records;j++) {
    avg+=pdata[j][field];
    var+=(pdata[j][field]*pdata[j][field]);
}

avg/= (double)num_records;
var=var/((double)num_records-avg*avg);

for(j=0;j<num_records;j++) {
    pdata[j][field] =(pdata[j][field]-avg)/sqrt(var);
}
return 1;
}
```